

工程设计与分析系列

ANSYS 电磁场分析

谢龙汉 耿 煜 邱 婉 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件,可应用于众多工业领域,如航空航天、汽车工业、生物医学、桥梁、建筑、电子产品、重型机械、微机电系统、运动器械等。该软件提供了 100 种以上的单元类型,用于模拟工程中的各种结构和材料。

本书以最新版本的 ANSYS 13.0 为蓝本,由浅入深、循序渐进地介绍 ANSYS 13.0 中电磁及耦合场分析知识,包括 ANSYS 概述,结构场分析,建立电磁场有限元模型,电磁场实体建模,网格化有限元模型的建立、求解和结果查看,耦合场分析,综合工程实例等知识。全书以图解的方式,通过基础知识和实例训练相结合的方式,讲解从建模到求解查看结果的基本知识和方法技巧,最后以综合实例的方式进一步向读者介绍常见电磁及耦合场分析的操作方法和操作技巧。

本书适合 ANSYS 初学者,可作为大中专院校电磁类相关专业和培训班的教材,同时对有限元仿真相关领域的专业技术人员也极有参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 电磁场分析/谢龙汉,耿煜,邱婉编著. —北京:电子工业出版社,2012.1

(工程设计与分析系列)

ISBN 978-7-121-14889-7

I. ①A… II. ①谢… ②耿… ③邱… III. ①电磁场—有限元分析—应用程序, ANSYS IV. ①O441.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 217200 号

策划编辑:许存权

责任编辑:陈韦凯 特约编辑:刘丽丽

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:24.75 字数:634 千字

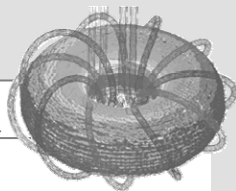
印 次:2012 年 1 月第 1 次印刷

册 数:4 000 册 定价:52.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。



前言

ANSYS 由世界上最大的有限元分析软件公司之一——美国 ANSYS 开发，它能与多数计算机辅助设计（CAD，Computer Aided Design）软件接口，实现数据的共享和交换，如 Pro/Engineer、NASTRAN、AutoCAD 等，是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。

ANSYS 具有强大的功能，主要包括三个部分：前处理模块、分析计算模块和后处理模块。在整个分析过程中，集成了建模、划分网格、求解和结果查看的整个过程。

最新版本的工程仿真软件 ANSYS 13.0 引入新的工具和技术，帮助用户更高效地完成工作，有效推动基于仿真的设计进入更广泛的应用领域。它节约时间，提高效率，为工作提供强有力的竞争优势。


本书是结合作者多年工作经验编写的，在编写过程中，突出了以下特点：

（1）直观性。全书以图解实例的形式介绍 ANSYS 的 GUI 操作，所有的操作流程尽可能集中在图片上，直观易懂，使读者能够更容易地获得知识。

（2）先进性。以最新的 ANSYS 13.0 为蓝本进行讲解，并参阅了国内外大量的成功教材，一切从满足中国用户的需求出发。

（3）实用性。全书采用基础知识和实例操作相结合的方法，互相补充，同时在内容关键处给予了有益的提示，使读者在学完本书后能够快速地将知识应用于自己的工作。

（4）循序渐进。全书采用由简到繁、循序渐进的方法，结合实例，一步一步地提高用户的软件操作水平，而且做到重要知识点均有实例示范，并适当回顾复习，使读者在学习繁杂的 ANSYS 时不至于手足无措。

（5）多媒体示范。本书的配套光盘中提供了所有实例的视频操作  **动画演示**，可以在观看录像时增强对知识点的理解。

本书分为 8 章

第 1 章 ANSYS 概述。首先介绍 ANSYS 的发展历史及 ANSYS 13.0 的主要特点，然后介绍 ANSYS 的安装方法和它对系统的配置要求，ANSYS 的基本架构和工作界面等，向读者推荐一些 ANSYS 的使用习惯和学习方法。最后通过一个入门引例，使读者初步了解用 ANSYS 进行电磁耦合分析的步骤。

第 2 章 结构场分析。介绍 ANSYS 结构场分析的典型步骤，同时让读者初步了解 ANSYS 有限元分析的通用步骤和方法。首先讲解如何建立有限元模型，划分网格的基本方法，然后加载负载，使用 ANSYS 仿真结果，最后介绍分析报告的基本写法。通过本章学习，读者可以熟悉有限元分析的通用步骤，一些常用的命令和菜单操作，为以后学习复杂的电磁耦合分析打下良好的基础。

第3章 建立电磁场有限元模型。首先介绍 ANSYS 中的坐标系，然后进一步介绍节点和单元操作，以降低有限元模型建立的工作量，最后介绍如何给磁场和电场施加负载，求解后如何查看分析结果。本章通过大量实例使读者初步对使用 ANSYS 分析电磁场有所了解。

第4章 电磁场实体建模。本章介绍实体建模的方法，使读者学会使用 ANSYS 建立点、线、面、体等，然后介绍一些布尔操作，方便模型建立，并配有实例。

第5章 网格化有限元模型的建立。本章介绍网格化有限元模型的建立方法，并配有实例，使读者学会如何设定网格大小、形状等属性，掌握划分网格的方法。

第6章 求解和结果查看。本章介绍 ANSYS 求解方法和结果查看方法。ANSYS 程序有多种解方程的方法：直接解法、稀疏矩阵直接解法、雅可比共轭梯度法（JCG），不完全分解共轭梯度法（ICCG）、预条件共轭梯度法（PCG）、自动迭代法（ITER）及分解块法（DDS）等。求解之后，想要查看结果，ANSYS 后处理器可以完成此功能。这一步可能是整个分析过程中最重要的一步，因为用户想要知道施加的负载怎样影响到自己的设计，自己划分的网格好用与否等。

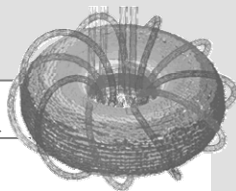
第7章 耦合场分析。耦合场分析是多种工程领域的综合分析，可以解决全局的工程问题，所以用户经常需要使用耦合场分析。当一个场分析的输入决定于另一个场分析的数据时，此分析就是耦合的。

第8章 综合工程实例。本章应用所学知识，给出五个综合工程实例。

本书主要由谢龙汉、耿煜、邱婉完成，参加本书编写和光盘开发的还有林伟、魏艳光、林木议、王悦阳、林伟洁、林树财、郑晓、吴苗、李翔、莫衍、朱小远、唐培培、尚涛、邓奕、张桂东、鲁力、刘文超、刘新东等，同时也非常感谢拓技工作室其他成员的帮助和支持。

由于时间仓促，书中难免有疏漏之处，请读者谅解。读者可通过电子邮件 reader.toptech@gmail.com 或者 mr.gengyu@gmail.com 与我们交流。

编著者



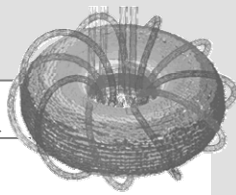
目 录

第 1 章 ANSYS 概述.....1	
1.1 ANSYS 概况及发展历史.....1	
1.1.1 ANSYS 概况.....1	
1.1.2 ANSYS 分析类型.....2	
1.1.3 软件组成.....3	
1.1.4 ANSYS 历史介绍.....4	
1.2 ANSYS 13.0 系统配置要求与安装.....7	
1.2.1 ANSYS 13.0 系统配置要求.....8	
1.2.2 ANSYS 13.0 安装.....8	
1.3 有限元法简介.....9	
1.3.1 有限元法分析计算的思路和做法.....9	
1.3.2 有限元分析的基本步骤.....10	
1.3.3 有限元的发展概况.....11	
实例 1-1 两端固定杆件受力分析.....11	
1.3.4 有限元系统基本构成.....13	
1.4 启动 ANSYS.....14	
1.5 ANSYS 工作界面.....15	
1.5.1 ANSYS 输出窗口.....15	
1.5.2 ANSYS 主窗口.....16	
1.5.3 ANSYS 主菜单.....16	
1.5.4 ANSYS 状态栏.....18	
1.5.5 ANSYS 命令输入窗口.....18	
1.5.6 ANSYS 图形显示窗口.....19	
1.5.7 ANSYS 工具栏.....19	
1.5.8 ANSYS 图像控制按钮.....19	
1.6 ANSYS 架构.....20	
1.6.1 ANSYS 架构简介.....20	
1.6.2 有关操作.....21	
1.7 ANSYS 文件.....23	
1.7.1 ANSYS 文件简介.....23	
1.7.2 文件操作.....24	
1.8 ANSYS 与 CAD 软件接口.....25	
1.9 怎样学习 ANSYS.....26	
1.10 入门引例——正方形电流环分析.....26	
1.10.1 问题描述.....26	
1.10.2 GUI 操作.....27	
1.10.3 命令流操作.....41	
第 2 章 结构场分析.....43	
2.1 为什么先学习结构场分析.....43	
2.2 建立有限元模型.....44	
2.2.1 有限元模型简介.....44	
2.2.2 定义工作名称和分析标题.....44	
2.2.3 定义单位.....47	
2.2.4 定义单元类型.....47	
2.2.5 定义实常数.....49	
2.2.6 定义材料属性.....51	
实例 2-1 定义单元类型, 材料属性.....52	
2.2.7 建立有限元模型——直接建模.....57	
实例 2-2 两端固定杆件建模.....61	
2.2.8 建立有限元模型——实体建模.....70	
2.3 划分网格.....73	
2.3.1 网格控制.....73	
2.3.2 网格产生.....77	
2.4 加载负载.....78	
2.4.1 负载类型.....78	
2.4.2 施加负载.....79	
实例 2-3 悬臂梁网格划分和施加载荷.....81	
2.5 求解.....89	
2.6 后处理器.....90	
实例 2-4 两端固定杆件求解及结果查看.....90	
2.7 分析报告概述.....96	
实例 2-5 梁应力及变形分析.....96	
实例 2-6 矩形平板受力变形分析.....104	
第 3 章 建立电磁场有限元模型.....111	
3.1 坐标系.....111	
3.1.1 坐标系简介.....112	

3.1.2 总体坐标系和局部坐标系	112	4.2.3 旋转工作平面	173
3.2 节点操作	115	4.3 群组命令介绍	174
3.2.1 节点的删除	115	4.4 自底向上建模	174
3.2.2 节点的其他生成方法	116	4.4.1 关键点	175
实例 3-1 二维平行板电容节点的 生成	118	4.4.2 硬点	177
实例 3-2 永磁铁回路节点的生成	122	4.4.3 线	178
3.2.3 节点选取	127	实例 4-1 马蹄形磁铁建模	180
3.3 单元操作	128	4.4.4 面	184
3.3.1 单元复制	128	4.4.5 体	185
3.3.2 显示编号	129	实例 4-2 平行板电容建模	185
3.3.3 单元属性	129	4.5 自顶向下建模	189
3.4 负载定义	130	4.5.1 定义矩形或六面体	189
3.4.1 磁场负载	130	4.5.2 定义环形面和柱	191
3.4.2 电场负载	131	4.6 布尔操作	193
实例 3-3 建立二维平行板电容的 单元, 设定负载	132	4.6.1 布尔操作设置	193
实例 3-4 建立永磁铁回路的单元, 设定负载	135	4.6.2 相交	193
3.5 求解和后处理器	140	4.6.3 相加	195
3.5.1 电场和磁场求解	140	4.6.4 相减	195
3.5.2 后处理器	141	4.6.5 重合	198
实例 3-5 二维平行板电容的求解, 查看结果	144	4.6.6 黏结	199
实例 3-6 永磁铁回路的求解, 查看 结果	147	实例 4-3 自顶向下建模	199
3.6 综合实例	151	4.7 综合实例	201
实例 3-7 二维平行板电容	151	实例 4-4 二维螺线管制动器建模	201
实例 3-8 正方形磁铁回路	159	实例 4-5 静电驱动梳建模	204
第 4 章 电磁场实体建模	170	第 5 章 网格化有限元模型的建立	208
4.1 实体建模简介	170	5.1 网格种类	208
4.1.1 自底向上建模	171	5.2 设定单元属性	209
4.1.2 自顶向下建模	171	5.2.1 建立单元属性表	209
4.1.3 使用布尔操作	171	5.2.2 赋予单元属性	209
4.1.4 拖拽和旋转操作	172	5.3 网格控制	210
4.1.5 移动和复制操作	172	5.3.1 单元形状	211
4.2 工作平面	172	5.3.2 选择网格类型	212
4.2.1 创建工作平面	173	实例 5-1 使用“MeshTool”进行 网格控制	212
4.2.2 移动工作平面	173	5.3.3 自由网格单元大小高级 设置方法	214
		5.3.4 映射网格默认单元大小	217
		实例 5-2 带小孔矩形网格划分 控制	218

5.3.5 局部网格控制	222	6.5.1 结果查看通用方法	265
5.3.6 内部网格控制	224	实例 6-3 二维带小孔平行板电容求 解和查看结果	270
5.3.7 网格控制优先级	225	6.5.2 磁场力	273
5.4 自由网格和映射网格控制	225	6.5.3 查看磁场力矩	275
5.4.1 面的映射网格划分	225	实例 6-4 永磁铁求解和查看结果	275
5.4.2 体的映射网格划分	229	6.5.4 从多导体系统中提取电导率	279
实例 5-3 正五边形网格划分	229	6.5.5 静电场力	280
5.5 划分实体模型	232	实例 6-5 电导率计算	280
5.5.1 产生点单元	232	6.6 综合实例	283
5.5.2 产生线单元	232	实例 6-6 三维带孔电容	283
5.5.3 产生面单元	233	实例 6-7 双导线系统	289
5.5.4 产生体单元	233	第 7 章 耦合场分析	293
5.6 划分网格注意事项	233	7.1 耦合场分析类型	293
5.6.1 避免尖锐角度	233	7.1.1 直接耦合法	294
5.6.2 避免剧烈网格渐变	234	7.1.2 载荷转移法	294
5.7 综合实例	234	7.1.3 ANSYS 分析类型	294
实例 5-4 划分铜导体模型网格	234	7.2 多步载荷	296
实例 5-5 划分双导线系统网格	238	7.3 直接耦合法	299
第 6 章 求解和结果查看	244	7.3.1 使用的单元	299
6.1 ANSYS 电磁场求解及结果查看概述	245	7.3.2 直接耦合法分析类型	299
6.2 磁场负载	245	实例 7-1 静电驱动结构	300
6.2.1 永磁铁	245	7.4 多场求解法	308
6.2.2 矢量磁位	246	7.4.1 建立场模型	308
6.2.3 磁场激励	247	7.4.2 标识场界面条件	308
6.2.4 磁场标识	248	7.4.3 场求解	309
6.2.5 麦克斯韦面 (MXWF)	249	实例 7-2 静电力驱动悬臂梁	313
6.2.6 磁虚位移 (MVDI)	249	7.5 载荷转移耦合物理场分析	326
实例 6-1 永磁铁建模和加载	250	7.5.1 物理场环境	326
6.3 电场负载	257	7.5.2 求解方法	326
6.3.1 电流 (AMPS)	257	7.5.3 使用多物理场环境求解	327
6.3.2 电压 (VOLT)	258	7.6 综合实例	327
6.3.3 电荷 (CHRG)	258	实例 7-3 带孔半圆壳热电耦合 分析	327
6.3.4 表面电荷密度 (CHRG)	258	实例 7-4 微机电路系统分析	332
6.3.5 无限表面标识 (INF)	259	第 8 章 综合工程实例	340
实例 6-2 二维带小孔平行板电容	259	8.1 工程实例 1——电致弹性分析	340
6.4 求解	263	8.1.1 GUI 操作	340
6.4.1 选择求解方法	263	8.1.2 命令流操作	345
6.4.2 开始求解	264		
6.5 查看结果	265		

8.2 工程实例 2——二维螺线管制动器 ..	347	8.4.1 GUI 操作	367
8.2.1 GUI 操作	348	8.4.2 命令流操作	375
8.2.2 命令流操作	355	8.5 工程实例 5——带电导体球周围电场	
8.3 工程实例 3——屏蔽微带传输线	358	分布	379
8.3.1 GUI 操作	359	8.5.1 GUI 操作	380
8.3.2 命令流操作	365	8.5.2 命令流操作	386
8.4 工程实例 4——梳状驱动器	367		



第1章 ANSYS 概述

本章首先介绍 ANSYS 的发展历史及 ANSYS 13.0 的主要特点，然后介绍 ANSYS 的安装方法和它对系统的配置要求，ANSYS 的基本架构和工作界面等，向读者推荐一些 ANSYS 的使用习惯和学习方法。最后通过一个入门引例，使读者初步了解用 ANSYS 进行电磁耦合分析的步骤。



本章内容

- ANSYS 历史
- ANSYS 安装
- 有限元分析简介
- ANSYS 工作界面
- ANSYS 基本架构
- ANSYS 文件
- ANSYS 与 CAD 软件接口
- 学习 ANSYS 建议



本章案例

- 两端固定杆件受力分析
- 正方形电流环分析头

1.1 ANSYS 概况及发展历史

本节介绍 ANSYS 的基本特点和应用领域，以及其发展历史。

1.1.1 ANSYS 概况

ANSYS 软件是融合结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。因此，它可应用于以下工业领域：航空航天、汽车工业、生物医学、桥梁、建筑、电

子产品、重型机械、微机电系统、运动器械等。该软件提供了 100 种以上的单元类型，用来模拟工程中的各种结构和材料。该软件有多种不同版本，可以运行在从个人机到大型机的多种计算机设备上，如 PC,SGI,HP,SUN,DEC,IBM,CRAY 等。

它由世界上最大的有限元分析软件公司之一——美国 ANSYS 开发，它能与多数 CAD 软件接口，实现数据的共享和交换，如 Pro/Engineer, NASTRAN, AutoCAD 等。

计算机辅助工程（CAE, Computer Aided Engineering）的技术种类有很多，其中包括有限元法（FEM, Finite Element Method）、边界元法（BEM, Boundary Element Method）、有限差法（FDM, Finite Difference Element Method）等。每一种方法各有其应用的领域，而其中有限元法应用的领域越来越广，现已应用于结构力学、结构动力学、热力学、流体力学、电路学、电磁学等。ANSYS 就是一款优秀的 CAE 软件。

1.1.2 ANSYS 分析类型

1. 结构静力分析

结构静力学分析用来求解外载荷引起的位移、应力和力。静力分析很适合求解惯性和阻尼对结构的影响并不显著的问题。ANSYS 程序中的静力分析不仅可以进行线性分析，而且可以进行非线性分析，如塑性、蠕变、膨胀、大变形、大应变及接触分析。

2. 结构动力学分析

结构动力学分析用来求解随时间变化的载荷对结构或部件的影响。与静力分析不同，动力分析要考虑随时间变化的力载荷及它对阻尼和惯性的影响。ANSYS 可进行的结构动力学分析类型包括：瞬态动力学分析、模态分析、谐波响应分析及随机振动响应分析。

3. 结构非线性分析

结构非线性导致结构或部件的响应随外载荷不成比例的变化。ANSYS 程序可求解静态和瞬态非线性问题，包括材料非线性、几何非线性和单元非线性三种。

4. 动力学分析

ANSYS 程序可以分析大型三维柔体运动。当运动的积累影响起主要作用时，可使用这些功能分析复杂结构在空间中的运动特性，并确定结构中由此产生的应力、应变和变形。

5. 热分析

程序可处理热传递的三种基本类型：传导、对流和辐射。热传递的三种类型均可进行稳态和瞬态、线性和非线性分析。热分析还具有可以模拟材料固化和熔解过程的相变分析能力，以及模拟热与结构应力之间的热—结构耦合分析能力。

6. 电磁场分析

电磁场分析主要用于电磁场问题的分析，如电感、电容、磁通量密度、涡流、电场分布、磁力线分布、力、运动效应、电路和能量损失等。还可用于螺线管、调节器、发电机、变换器、磁体、加速器、电解槽及无损检测装置等的设计和分析领域。

7. 流体动力学分析

ANSYS 流体单元能进行流体动力学分析, 分析类型可以分为瞬态或稳态。分析结果可以是每个节点的压力和通过每个单元的流率。并且可以利用后处理功能产生压力、流率和温度分布的图形显示。另外, 还可以使用三维表面效应单元和热一流管单元模拟结构的流体绕流并包括对流换热效应。

8. 声场分析

程序的声学功能用来研究在含有流体的介质中声波的传播, 或分析浸在流体中的固体结构的动态特性。这些功能可用来确定音响话筒的频率响应, 研究音乐大厅的声场强度分布, 或预测水对振动船体的阻尼效应。

9. 压电分析

压电分析用于分析二维或三维结构对 AC (交流)、DC (直流) 或任意随时间变化的电流或机械载荷的响应。这种分析类型可用于换热器、振荡器、谐振器、麦克风等部件及其他电子设备的结构动态性能分析。可进行四种类型的分析: 静态分析、模态分析、谐波响应分析、瞬态响应分析。

1.1.3 软件组成

软件主要包括三个部分: 前处理模块、分析计算模块和后处理模块。

前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具, 用户可以方便地构造有限元模型。

1. 前处理模块

ANSYS 的前处理模块主要有两部分内容: 实体建模和网格划分。

(1) 实体建模

ANSYS 程序提供了两种实体建模方法: 自顶向下与自底向上。自顶向下进行实体建模时, 用户定义一个模型的最高级图元, 如球、棱柱, 称为基元, 程序则自动定义相关的面、线及关键点。用户利用这些高级图元直接构造几何模型, 如二维的圆和矩形及三维的块、球、锥和柱。无论使用自顶向下还是自底向上方法建模, 用户均能使用布尔运算来组合数据集, 从而“雕塑出”一个实体模型。ANSYS 程序提供了完整的布尔运算, 如相加、相减、相交、分割、黏合结和重叠。在创建复杂实体模型时, 对线、面、体、基元的布尔操作能减少相当可观的建模工作量。ANSYS 程序还提供了拖拉、延伸、旋转、移动、延伸和复制实体模型图元的功能。附加的功能还包括圆弧构造、切线构造、通过拖拉与旋转生成面和体、线与面的自动相交运算、自动倒角生成、用于网格划分的关键点的建立、移动、复制和删除。自底向上进行实体建模时, 用户从最低级的图元向上构造模型, 即用户首先定义关键点, 然后依次是相关的线、面、体。

(2) 网格划分

ANSYS 程序提供了使用便捷、高质量的对 CAD 模型进行网格划分的功能。包括四种网格划分方法: 延伸划分、映像划分、自由划分和自适应划分。延伸网格划分可将一个二

维网格延伸成一个三维网格。映像网格划分允许用户将几何模型分解成简单的几部分，然后选择合适的单元属性和网格控制，生成映像网格。ANSYS 程序的自由网格划分器功能是十分强大的，可对复杂模型直接划分，避免了用户对各个部分分别划分然后进行组装时，各部分网格不匹配带来的麻烦。自适应网格划分是在生成了具有边界条件的实体模型以后，用户指示程序自动地生成有限元网格，分析、估计网格的离散误差，然后重新定义网格大小，再次分析计算、估计网格的离散误差，直至误差低于用户定义的值或达到用户定义的求解次数。

2. 分析计算模块

分析计算模块包括结构分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力。

3. 后处理模块

后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示（可看到结构内部）等图形方式显示出来，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

1.1.4 ANSYS 历史介绍

1. 早先版本

1963 年，ANSYS 的创办人 John Swanson 博士任职于美国宾州匹兹堡西屋公司的太空核子实验室。当时他的工作之一是为某个核子反应火箭作应力分析。为了工作上的需要，Swanson 博士写了一些程序来计算加载温度和压力的结构应力和变位。几年下来，建立在 Wilson 博士原有的有限元素法热传导程序上，扩充了不少三维分析的程序，包括板壳、非线性、塑性、潜变、动态全程等。此程序当时命名为 STASYS（Structural Analysis System）。

为了取代复杂的手算，Swanson 博士设想利用有限元法程序。Swanson 博士于 1969 年在临近匹兹堡的家中车库创立了他自己的公司 Swanson Analysis Systems Inc（SASI）。在这里他用打洞器在计算机输入卡上打洞写程序，并租用美国钢铁公司的大型计算机。20 世纪 70 年代结束之前，商用软件 ANSYS 宣告诞生，而西屋也成为他的第一个顾客。

1984 年，ANSYS 4.0 开始支持个人计算机。当时使用的芯片是 Intel 286，使用指令互动的模式，可以在屏幕上绘出简单的节点和元素。不过这时还没有 Motif 规格的图型界面。ANSYS 在 PC 上的第 1 版，前置处理、后置处理及求解都在不同的程序上执行。

1989 年，ANSYS 收购 Compuflo，使 ANSYS 5.0 版和 FLOTRAN 2.1A 版合并。

1996 年，ANSYS 推出 5.3 版。此版是 ANSYS 第一次支持 LS-DYNA。此时，ANSYS/LS-DYNA 仍是起步阶段。

1997~1998，ANSYS 开始向美国许多著名教授和大学实验室发送教育版，期望能在学生及学校扎根推广 ANSYS。

2001 年 12 月, ANSYS 6.0 版开始发售。此版的离散 (Sparse) 求解模块有显著的改进, 不但速度增快, 而且内存空间需求大为减小。在此版之前, ANSYS 多半建议用户使用 PCG 模块解决大型的模型。

2002 年 10 月, ANSYS 推出 7.0 版。此版的离散求解模块有更进一步的改进, 一般而言, 效率比 6.0 版提高 20%~30%。在接触分析方面亦有一些重大的改进和加强。

2. ANSYS 10.0

2005 年 7 月, ANSYS 推出 10.0 版本。此版本在性能、易用性、协同工作及耦合技术, 如流固耦合等方面有很大提高。10.0 版本是在 9.0 软件的基础上研发的, 与其有很好的兼容性。

延续了 ANSYS 一贯强大的耦合场技术, 10.0 版本为复杂的流固耦合 (FSI) 问题提供了更完善的解决方案。该版本整合了世界一流的应力分析和流体分析技术, 形成了一套完整的 FSI 解决方案。通过适合于特定场要求的网格划分, 一个单一的几何体可以应用于两种场。该版本提供了有效地解决 FSI 动力学分析的信息交换功能。目前, 市场上没有任何其他的 FSI 软件可以提供如此强大的稳健性和高度的精确性分析。另外, 该版本可以在多个机群进行并行处理解决超大模型。

为了满足日益增加的对大型复杂问题及时有效的分析需求, ANSYS 10.0 的并行求解器现今增加了对 CPU 和通信技术的选择余地。除了支持 Ethernet 和 Gigabit Ethernet, ANSYS 10.0 还支持 Myrinet 和 InfiniBand。相对于以前的架构, ANSYS 10.0 能以最低的成本满足高性能的机群计算。

本着以低成本硬件设备提供高性能解决方案的目标, ANSYS Workbench 现可支持 Windows XP 64 位机的 AMD 和 EMT64 芯片集。此项改革解决了许多用户在 Windows 操作系统下运行大型模型所面临的 2GB 内存限制的问题。另外, 它也使得 ANSYS 用户不再需要写硬盘就能完成整个求解, 从而节约求解时间。

对于用户, 这将帮助他们更加经济有效地解决大型模型问题, 如低频稳态和全瞬态电磁分析问题。ANSYS 10.0 并行求解器可以解决高于 1 亿自由度的大型电磁问题, 在 CAE 行业独树一帜。

在高频电磁领域, 10.0 版本提供了一个新的模式端口。此端口大大简化了集成电路 (IC)、射频识别 (RFID) 和射频微机电系统 (MEMS) 等多种设备分析传输线端口的建模。标准算例显示, 利用此端口建模, 可以显著缩小模型尺寸, 在保证精确的频域计算结果前提下, 节约 30%~50% 的求解时间和内存需求。

3. ANSYS 13.0

ANSYS 公司最新版本的工程仿真软件 ANSYS 13.0, 引入新的工具和技术, 帮助用户更高效地完成工作, 有效推动基于仿真的设计进入更广泛的应用领域。这个版本在 CAE 功能上引领现代产品研发科技, 涉及的内容包括高级分析、网格划分、优化、多物理场和多体动力学。

立足于拥有世界上最多的用户, ANSYS 13.0 不仅为当前的商业应用提供了新技术, 而且在以下方面取得了显著进步:

- ① 继续开发和提供世界一流的求解器技术;
- ② 提供了针对复杂仿真的多物理场耦合解决方法;
- ③ 整合了 ANSYS 的网格技术并产生统一的网格环境;
- ④ 通过对先进的软硬件平台的支持来实现对大规模问题的高效求解。
- ⑤ 继续改进最好的 CAE 集成环境——ANSYS WORKBENCH;
- ⑥ 继续融合先进的计算流体动力学技术。

ANSYS 软件开发的核心目标就是提供给用户最高级和最可靠的适用于各行各业的仿真解决方案。下面的亮点展示了 ANSYS 13.0 的某些关键新技术,可以提高用户的效率,帮助各大企业用户继续拓展仿真在产品开发过程中的角色。

(1) 加速多步求解

ANSYS VT 加速器,基于 ANSYS 变分技术,是通过减少迭代总步数以加速多步分析的数学方法。包括收敛迭代和时间步迭代或者二者的综合。收敛迭代的例子是非线性静态分析,不涉及接触或塑性,而时间步迭代指的是线性瞬态结构分析、二者组合的例子、非线性结构瞬态或者热瞬态分析。ANSYS VT 加速器提供了 2~10 倍的加速比,允许用户快速重新运行模型。具体的加速比受到硬件、模型和分析类型的影响。而且,这个工具在非线性和瞬态分析的参数研究中可以获得 5~30 倍的加速。

ANSYS VT 加速器软件,使用 ANSYS MECHANICAL HPC 的授权,可以应用到结构循环对称模态分析,以及高频电磁谐波分析。ANSYS VT 加速器可以结合 ANSYS DESIGN XPLOER VT 技术,实现更快速的参数化研究。

(2) 网格变形和优化

对于很多单位,进行优化分析的最大障碍是 CAD 模型不能重新生成,特征参数不能反映那些修改研究的几何改变。通过与 ANSYS WORKBENCH 的结合,ANSYS MESH MORPHER (FE-MODELER 的新增加模块)可以实现这个功能,甚至更多。通过网格操作而不是实体模型,ANSYS MESH MORPHER 对于来自 CAD 的非参数几何数据,如 IGES 或者 STEP,以及来自 ANSYS CDB 文件的网格数据,实现了模型参数化。将网格读入 FE-MODELER,并且产生对应于该网格的“综合几何”的初次配置。在 ANSYS 13.0 中,ANSYS MESH MORPHER 提供了四种不同的转换:面平移、面偏置、边平移和边偏置。更多样的配置可以通过以上转换的组合实现。例如,一个圆柱表面的面偏置就等效于变更其半径。

这些转换决定了目标配置并自动定义转换参数。一旦确定,这些转换参数可以通过 ANSYS DESIGNXPLOER VT 拟合方法来拟合,如 KRIGING 算法、非参数化退火算法和神经网络算法等。一旦拟合完成,可以使用 ANSYS DESIGNXPLOER VT 中的能量优化技术找到最优值或者执行 6 SIGMA 分析设计。ANSYS MESH MORPHER 为仿真驱动的产品开发打破了优化障碍。

(3) 流固耦合

在 ANSYS WORKBENCH 中,ANSYS 和 ANSYS CFX 技术的集成取得了更大的进步。在 13.0 的 ANSYS WORKBENCH 环境中,用户可以完整地建立、求解和后处理双向流固耦合仿真。最新的版本也提供了单一后处理工具,可以用更少的时间获得复杂多物理问

题的解决，并且扩展了仿真的应用领域。利用 ANSYS CFX 软件的统一网格接口可以在 ANSYS 和 ANSYS CFX 之间传递 FSI 载荷，所有流固耦合问题的结果的鲁棒性和精度获得了改进。界面载荷传递技术的突破，很明显的好处就在于让同一团队的 FEA 和 CFD 专家共享信息更方便。在 13.0 中流固耦合的领域也得到了扩展。

(4) 涡轮系统一体化解决方案

ANSYS WORKBENCH 环境提供了旋转机械设计过程所需的几何设计和分析的集成系统。ANSYS WORKBENCH，作为高级物理问题的集成平台，能够让设计人员建立旋转机械的模型，例如，水泵、压缩机、风扇、吹风机、涡轮、膨胀器、涡轮增压器和鼓风机。ANSYS 解决方案集成到设计过程，从而消除了中性文件传输、结果变换和重分析，使得 CAE 过程几周内就完成了。涡轮机械设计过程的第一步就是使用初始尺寸以获得概要设计，指定性能准则和尺寸约束。在 13.0 中，ANSYS BLADEMODELER 中集成了 PCA 工程有限公司的专用于离心压缩机和水泵的初始尺寸软件。VISTA-CC 是一个快速主干设计程序——只需要压缩机的质量流量、压力比和几何约束，就可以获得压缩机草图、叶片和出口角度、速度三角形。它也提供了无量纲的性能参数，如设计决策所依赖的额定转速和额定流率。1-D 尺寸工具、自动网格、流线工具和自动报告生成器的引入，帮助用户开发更好的旋转机械。ANSYS 承诺将持续为特定工业需求开发更强大的解决方案，以上的具体集成就是一个例子。

(5) 统一网格技术

ANSYS 13.0 提供给用户新的统一分网环境，帮助用户实现基于物理的网格划分解决方案，例如，机械、电磁、CFD 或者显式仿真。来自 ANSYS、ANSYS ICEM CFD 和 ANSYS CFX 的一流网格几乎已经延伸到 ANSYS WORKBENCH 中，综合多种算法的优势，提供一个智能的、灵活且鲁棒的网格划分能力。

基于预定义的物理过滤器，各种控制自动定义，例如，网格尺寸、网格过渡、网格均匀性、划分速度、网格质量和曲率的细化控制等。如果必要，高级用户控制选项可拿来使用。划网的智能特性提供了灵活的附加控制，帮助初级用户为了改进求解速度或者精度而得到适合于物理问题的良好网格。多重网格控制方法，以及高级选项，提供了备份网格划分方法以改善网格划分的整体鲁棒性。在 13.0 中，共同网格对象已经实现了，并为多个应用之间的交互提供了附加的灵活性。这为求解器（FSI、隐式/显式等）之间的交互提供了较强的双向通信能力，同时，也提供了网格划分的统一方法。这个共同网格对象保证了在 ANSYS WORKBENCH 框架中集成第三方的划网功能。

1.2 ANSYS 13.0 系统配置要求与安装

在熟悉了 ANSYS 的基本情况及强大功能后，本节介绍 ANSYS 13.0 的系统配置要求及其安装方法。本节介绍 ANSYS 在 Windows 下的安装方法。由于 ANSYS 安装复杂，稍有不慎就会导致无法使用，所以，请读者认真阅读本小节内容，顺利安装成功 ANSYS。

1.2.1 ANSYS 13.0 系统配置要求

在正式安装软件之前，读者需要首先了解 ANSYS 对系统的配置要求。

平台及操作系统：Intel IA-64 bit / Windows XP 64-bit Edition Version 2003, Intel IA-32 bit/Windows XP Home or Professional (Build 2600) Version 5.1, Intel IA-32 bit/Windows 2000 Version 5.0 (Build 2195)。

硬件要求：至少需要 512MB 内存（对于安腾处理器系统，至少需要 1GB 内存）。磁盘剩余空间至少 2.2GB。注意：无论是何种 ANSYS 产品，操作系统盘（一般是 C 盘）的剩余空间至少需要 100MB。

1.2.2 ANSYS 13.0 安装

插入 ANSYS 13.0 安装光盘，出现如图 1-1 所示对话框。开始安装 ANSYS，单击“Install ANSYS, Inc. Products”按钮开始安装 ANSYS。

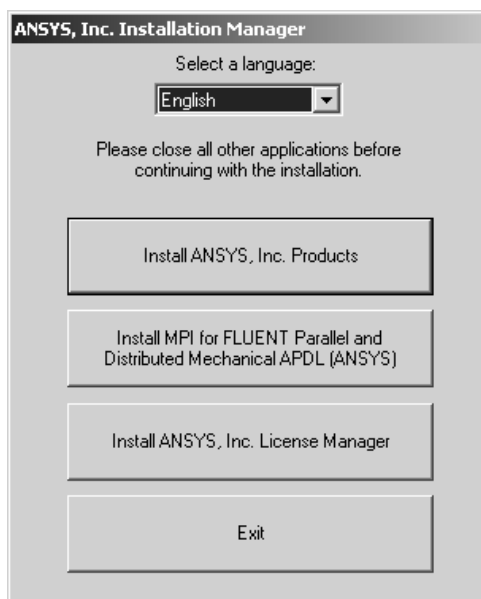


图 1-1 ANSYS 13.0 安装初始界面

之后，选择安装目录，如图 1-2 所示，选择 ANSYS 的安装路径，图中将 ANSYS 安装在 C 盘。单击“Next”按钮进行下一步安装，选择需要的组件进行安装（图 1-3），然后单击“Next”按钮直到安装。

ANSYS 13.0 安装完成后，系统会要求安装 ANSYS License，从图 1-1 中选择“Install ANSYS, Inc. Products License Manager”菜单选项。然后选择“I AGREE”（图 1-4）。然后，安装程序询问是否现在安装 License 文件，这里选择“Run the ANSYS License Interconnect with FLEXlm (default)”，然后安装自己的 license 文件（图 1-5）。然后依照提示安装，最后单击“确定”按钮完成。

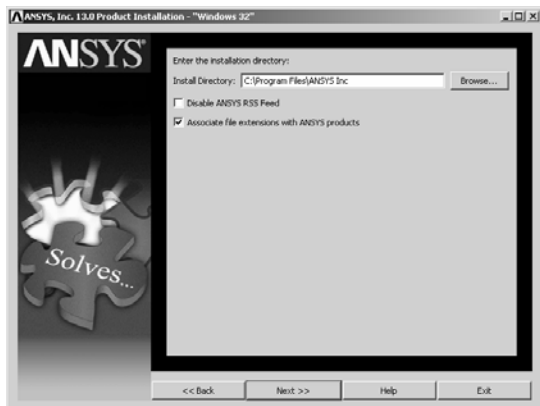


图 1-2 选择安装 ANSYS 13.0 路径

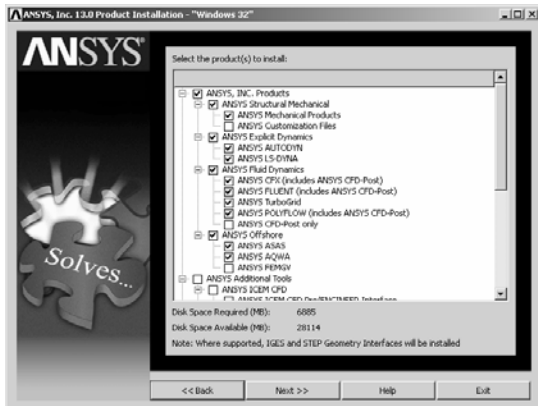


图 1-3 选择需要的组件进行安装

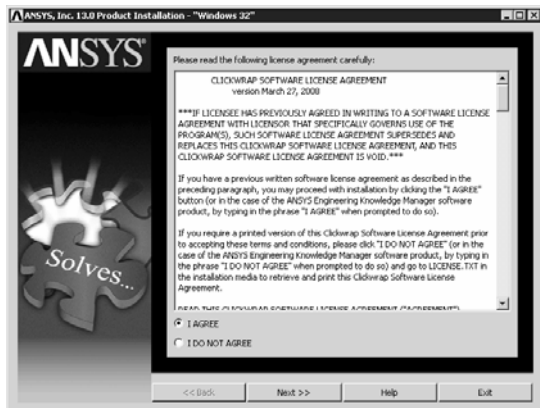


图 1-4 选择是否为 license server

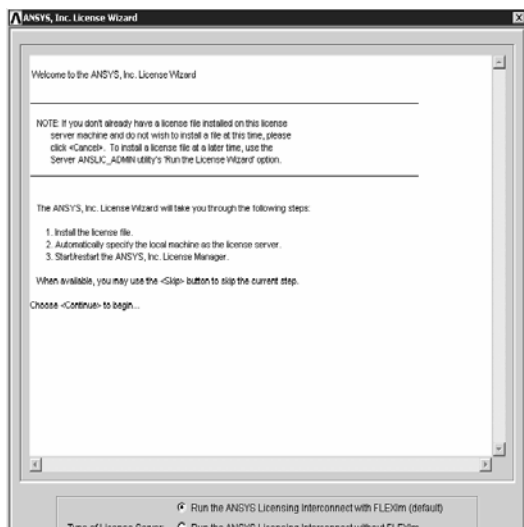


图 1-5 开始安装 license 文件

1.3 有限元法简介

有限单元法是随着电子计算机的发展而迅速发展起来的一种现代计算方法。它是 20 世纪 50 年代首先在连续体力学领域——飞机结构静、动态特性分析中应用的一种有效的数值分析方法，随后很快广泛地应用于求解热传导、电磁场、流体力学等连续性问题。

1.3.1 有限元法分析计算的思路 and 做法

有限元法分析计算的思路 and 做法可归纳如下：

1. 物体离散化

将某个工程结构离散为由各种单元组成的计算模型，这一步称做单元剖分。离散后单元与单元之间利用单元的节点相互连接起来；单元节点的设置、性质、数目等应视问题的

性质、描述变形形态的需要和计算进度而定（一般情况下，单元划分越细则描述变形情况越精确，即越接近实际变形，但计算量越大）。所以，有限元中分析的结构已不是原有的物体或结构物，而是同新材料的由众多单元以一定方式连接成的离散物体。这样，用有限元分析计算所获得的结果只是近似的。如果划分单元数目非常多而又合理，则所获得的结果就与实际情况相符合。

2. 单元特性分析

选择位移模式。在有限单元法中，选择节点位移作为基本未知量时称为位移法；选择节点力作为基本未知量时称为力法；取一部分节点力和一部分节点位移作为基本未知量时称为混合法。位移法易于实现计算自动化，所以，在有限单元法中位移法应用范围最广。

当采用位移法时，物体或结构物离散化之后，就可把单元总的一些物理量如位移、应变和应力等由节点位移来表示。这时可以对单元中位移的分布采用一些能逼近原函数的近似函数予以描述。通常，利用有限元法将位移表示为坐标变量的简单函数，这种函数称为位移模式或位移函数。

分析单元的力学性质。根据单元的材料性质、形状、尺寸、节点数目、位置及其含义等，找出单元节点力和节点位移的关系式，这是单元分析中的关键一步。此时，需要应用弹性力学中的几何方程和物理方程来建立力和位移的方程式，从而导出单元刚度矩阵，这是有限元法的基本步骤之一。

计算等效节点力。物体离散化后，假定力是通过节点从一个单元传递到另一个单元。但是，对于实际的连续体，力是从单元的公共边传递到另一个单元中去的。因而，这种作用在单元边界上的表面力、体积力和集中力都需要等效的移到节点上去，也就是用等效的节点力来代替所有作用在单元上的力。

3. 单元组集

利用结构力的平衡条件和边界条件把各个单元按原来的结构重新连接起来，形成整体的有限元方程，即

$$[\text{整体结构的刚度矩阵 } K] \times [\text{节点位移列阵 } q] = [\text{载荷列阵 } f] \quad (1.1)$$

4. 求解未知节点位移

解有限元方程式（1.1）得出位移。这里，可以根据方程组的具体特点来选择合适的计算方法。

通过上述分析，可以看出，有限单元法的基本思想是“一分一合”，分是为了进行单元分析，合则为了对整体结构进行综合分析。

1.3.2 有限元分析的基本步骤

对于不同物理性质和数学模型的问题，有限元求解法的基本步骤是相同的，只是具体公式推导和运算求解不同。有限元求解问题的基本步骤如下：

第一步问题及求解域定义。根据实际问题近似确定求解域的物理性质和几何区域。

第二步求解域离散化。将求解域近似为具有不同有限大小和形状且彼此相连的有限个

单元组成的离散域，习惯上称为有限元网络划分。显然单元越小（网络越细）则离散域的近似程度越好，计算结果也越精确，但计算量及误差都将增大，因此，求解域的离散化是有限元法的核心技术之一。

第三步确定状态变量及控制方法。一个具体的物理问题通常可以用一组包含问题状态变量边界条件的微分方程表示，为适合有限元求解，通常将微分方程化为等价的泛函形式。

第四步单元推导。对单元构造一个适合的近似解，即推导有限单元的列式，其中包括选择合理的单元坐标系，建立单元试函数，以某种方法给出单元各状态变量的离散关系，从而形成单元矩阵（结构力学中称刚度阵或柔度阵）。

为保证问题求解的收敛性，单元推导有许多原则要遵循。对工程应用而言，重要的是应注意每种单元的解题性能与约束。例如，单元形状应以规则为好，畸形时不仅精度低，而且有缺秩的危险，将导致无法求解。

第五步总装求解。将单元总装形成离散域的总矩阵方程（联合方程组），反映对近似求解域的离散域的要求，即单元函数的连续性要满足一定的连续条件。总装是在相邻单元节点进行，状态变量及其导数（可能的话）连续性建立在节点处。

第六步联立方程组求解和结果解释。有限元法最终导致联立方程组。联立方程组的求解可用直接法、迭代法和随机法。求解结果是单元节点处状态变量的近似值。对于计算结果的质量，将通过与设计准则提供的允许值比较来评价并确定是否需要重复计算。

简言之，有限元分析可分成三个阶段，前处理、处理和后处理。前处理是建立有限元模型，完成单元网格划分；后处理则是采集处理分析结果，使用户能简便提取信息，了解计算结果。

1.3.3 有限元的发展概况

1943 年，Courant 在论文中取定义在三角形域上的分片连续函数，利用最小势能原理研究 St.Venant 的扭转问题。

1960 年，Clough 的平面弹性论文中用“有限元法”这个名称。

1970 年，随着计算机和软件的发展，有限元发展起来。

实例 1-1 两端固定杆件受力分析

两端固定杆件收到轴向作用力 F_1 、 F_2 ，求固定端反作用力 R_1 、 R_2 。图 1-6(a)为所探讨的工程系统模型，图 1-6(b)为对应的有限元模型，此模型中有四个节点、三个杆件元素，外力负载及约束条件如下：

- ① 第二点受到外力 F_2 ；
- ② 第三点受到外力 F_1 ；
- ③ 第一点和第四点固定，没有位移变形。

其中， $l = 10\text{m}$ ， $a = b = 0.3l$ ， $E = 30 \times 10^6 \text{Pa}$ ， $F_1 = 2F_2 = 1000 \text{N}$ 。

求解步骤如下：

1. 常规方法

因为节点 4 位移为 0，所以，由于单元 1、2 受力 F_1 、 F_2 压缩产生的形变 Δl_1 和杆件整

体由于 R_1 拉伸产生的 Δl 相同, 即 $\Delta l_1 = \Delta l$ 。由条件可得

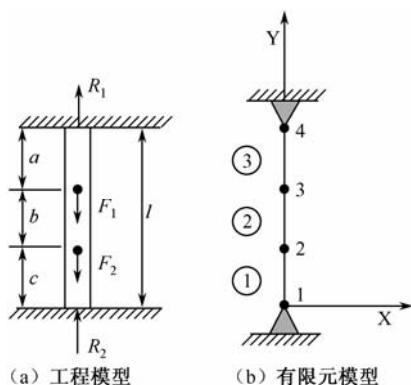


图 1-6 两端固定杆件受力分析

$$\frac{F_1}{k_1} + \frac{F_2}{k_2} = \frac{R_1}{k} \quad (1.2)$$

式中, $k_1 = \frac{AE}{0.7l}$, $k_2 = \frac{AE}{0.4l}$ 。

求解式 (1.2) 得 $R_1 = 900\text{N}$, 同理可得 $R_2 = 600\text{N}$ 。

2. 有限元解法

(1) 将问题离散成有限个单元

离散后的模型中有四个节点、三个杆件元素, 如图 1-7 所示。单元 1,2,3 原始长度分别为 $c = 0.4l, b, a$ 。

(2) 建立求解方程

假设横截面积为 A , 长度为 x 的杆件单元, 在外力 F 作用下, 应力为

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.3)$$

杆件应变为

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} \quad (1.4)$$

式中, Δx 为单元长度变化量。

应力应变服从胡克定律, 有

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1.5)$$

联立式 (1.1)、式 (1.2) 和式 (1.3), 有

$$F = \left(\frac{AE}{x}\right)\Delta x \quad (1.6)$$

这样, 其等价刚度为

$$k = \frac{AE}{x} \quad (1.7)$$

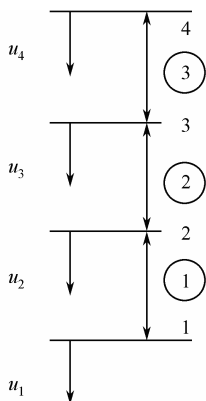


图 1-7 离散后的模型

单元 1,2,3 的等价刚度分别为 $k_1 = \frac{AE}{0.4l}$, $k_2 = \frac{AE}{0.3l}$, $k_3 = \frac{AE}{0.3l}$ 。

单元的位移为 u , 每个单元的弹性行为可由如下方程表示为

$$f = k_i(u_{i+1} - u_i) = \frac{AE}{x}(u_{i+1} - u_i) \quad (1.8)$$

静力平衡要求每个节点上的合力为零, 这样产生如下方程组, 即

$$\begin{cases} R_2 - k_1(u_2 - u_1) = 0 \\ F_2 + k_1(u_2 - u_1) - k_2(u_3 - u_2) = 0 \\ F_1 + k_2(u_3 - u_2) - k_3(u_4 - u_3) = 0 \\ k_3(u_4 - u_3) + R_1 = 0 \end{cases} \quad (1.9)$$

分离出作用力与反作用力, 得

$$\begin{cases} -k_1(u_2 - u_1) = -R_2 \\ k_1(u_2 - u_1) - k_2(u_3 - u_2) = -F_2 \\ k_2(u_3 - u_2) - k_3(u_4 - u_3) = -F_1 \\ k_3(u_4 - u_3) = -R_1 \end{cases} \quad (1.10)$$

且由条件知: u_1, u_4 为 0, 则上式继续简化为

$$\begin{cases} -k_1 u_2 = -R_2 \\ k_1 u_2 - k_2(u_3 - u_2) = -F_2 \\ k_2(u_3 - u_2) + k_3 u_3 = -F_1 \\ -k_3 u_3 = -R_1 \end{cases} \quad (1.11)$$

(3) 建立刚度矩阵

将式 (1.11) 写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} 0 & -k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & 0 \\ 0 & 0 & -k_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_2 \\ -F_2 \\ -F_1 \\ -R_1 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

代入已知条件得 $R_1 = 900\text{N}$, $R_2 = 600\text{N}$ 。

1.3.4 有限元系统基本构成

1. 节点 (Node)

节点就是工程模型系统中的一个点的坐标位置, 是有限元模型的最基本对象。它具有其物理意义的自由度, 该自由度为结构系统受到外力后系统的反应。自由度可为位移、温度、电压等, 依不同类型问题而定, 节点上为施加集中力所在, 如力、力矩、热流、温度等。

节点坐标系用以确定节点的每个自由度的方向, 每个节点都有其自己的坐标系, 在默

认状态下, 不管用户在什么坐标系下建立的有限元模型, 节点坐标系都是与总体笛卡儿坐标系平行的。有限元分析中的很多相关量都是在节点坐标系下解释的, 这些量包括:

(1) 输入数据

- ① 自由度常数;
- ② 力;
- ③ 主自由度;
- ④ 耦合节点;
- ⑤ 约束方程等;

(2) 输出数据

- ① 节点自由度结果;
- ② 节点载荷;
- ③ 反作用载荷等;

但实际情况是, 在很多分析中, 自由度的方向并不总是与总体笛卡儿坐标系平行的, 例如, 柱坐标系、球坐标系等, 这些情况下, 可以利用 ANSYS 的“旋转节点坐标系”的功能来实现节点坐标系的变化, 使其变换到需要的坐标系下。

2. 单元 (Element)

单元是节点与节点所连接而成的, 单元的组合由各节点相互连接, 并构成结构数学模型的刚度矩阵。不同特性的工程系统, 可选用不同种类的单元。

3. 自由度 (Degree of Freedom)

自由度表示工程受到外力作用后的反应结果。以三维空间物体而言, 完全确定一个物体在空间位置所需要的独立坐标数目, 称为这个物体的自由度。

(1) 质点自由度

① 一个质点在空间任意运动, 需用三个独立坐标 (x, y, z) 确定其位置。所以, 自由质点有三个平动自由度, 即 $i=3$;

② 如果对质点的运动加以限制 (约束), 自由度将减少。如质点被限制在平面或曲面上运动, 则 $i=2$; 如果质点被限制在直线或平面曲线 (不是空间曲线) 上运动, 则其自由度 $i=1$ 。

(2) 刚体自由度

一个刚体在空间任意运动时, 可分解为质心 O' 的平动和绕通过质心轴的转动, 它既有平动自由度还有转动自由度。确定刚体质心 O' 的位置, 需三个独立坐标 (x, y, z) , 自由刚体有三个平动自由度 $t=3$ 。

确定刚体通过质心轴的空间方位, 三个方位角 (α, β, γ) 中只有其中两个是独立的, 需两个转动自由度; 另外还要确定刚体绕通过质心轴转过的角度 θ , 还需一个转动自由度。这样, 确定刚体绕通过质心轴的转动, 共有三个转动自由度 $r=3$ 。所以, 一个任意运动的刚体, 总共有六个自由度, 三个平动自由度和三个转动自由度, 即 $i=t+r=3+3=6$ 。

其他可能的自由度有温度 (热分析)、电压和磁位能 (电磁分析) 等。

1.4 启动 ANSYS

ANSYS 安装完成后, 最好按照以下方式启动: 开始 → 所有程序 → ANSYS 13.0 →

ANSYS Product Launcher (图 1-8), 当然也可以直接采用开始→所有程序→ANSYS 13.0→ANSYS 方式启动, 但是使用前种方法可以对 ANSYS 进行初始的设置。ANSYS 工作目录下存放着有限元分析使用和生成的文件, 所以, 最好此目录所在磁盘有较大空间。ANSYS 默认打开或者保存文件的路径也是工作目录。

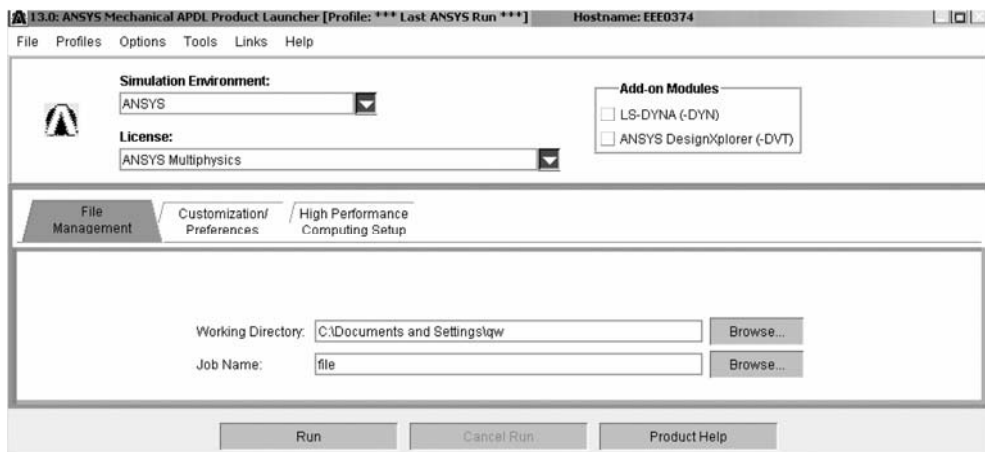


图 1-8 ANSYS Product Launcher 窗口

1.5 ANSYS 工作界面

本节介绍了 ANSYS 的输出窗口、主窗口, 以及主窗口的组成。

1.5.1 ANSYS 输出窗口

刚打开 ANSYS 时, 会出现两个窗口, 其中一个是 DOS 窗口, 这个窗口就是 ANSYS 的输出窗口, 如图 1-9 所示。该窗口记录一些 ANSYS 的配置信息和运行时的命令等内容, 在主窗口进行的 GUI 操作会自动转化到此窗口。更详细的运行信息可以在.log 文件和.err 中查看 (参见 1.7.1 ANSYS 文件简介)。

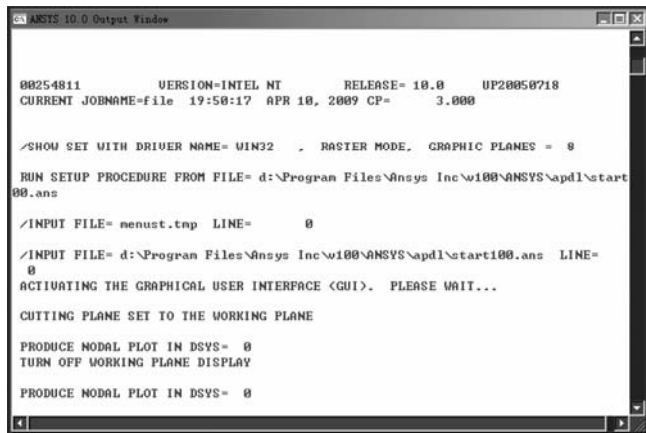


图 1-9 ANSYS 输出窗口

1.5.2 ANSYS 主窗口

ANSYS 主窗口即刚打开 ANSYS 时的另一个窗口。大部分的操作都可以在此窗口中完成。主窗口如图 1-10 所示。ANSYS 的主窗口由主菜单、状态栏、命令输入窗口、图形显示窗口、工具栏、状态栏、图形显示控制区组成。

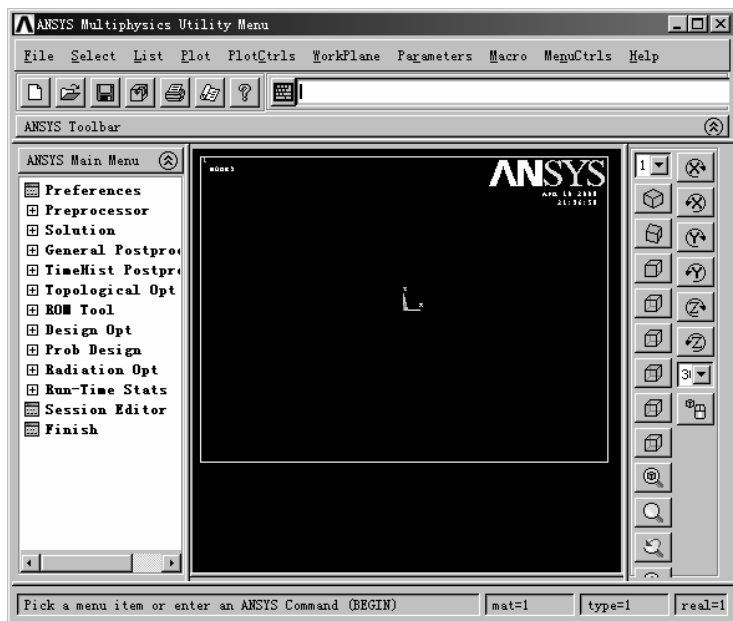


图 1-10 ANSYS 主窗口

1.5.3 ANSYS 主菜单

ANSYS 主菜单位于 ANSYS 主窗口的左下角 (图 1-11), 包含了 ANSYS 主要功能, 是用户开始分析的入手位置。用户可以在这里建立有限元模型并仿真。主菜单以树形结构呈现, 这种结构使用户随着分析的进行可以自然的对子菜单进行操作。

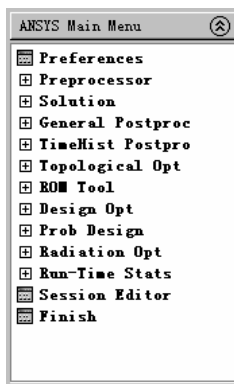


图 1-11 ANSYS 主菜单

这里，用户可以设定使用偏好（Preference），在不同层间及层中不同处理器之间切换。

1. 使用偏好（Preference）

使用偏好（Preference）是一项用户使用图形用户界面最有用的自定义，可以在此处过滤自己的菜单选择（图 1-12）。过滤使用户不需要的许多功能变为灰色或者完全隐藏。

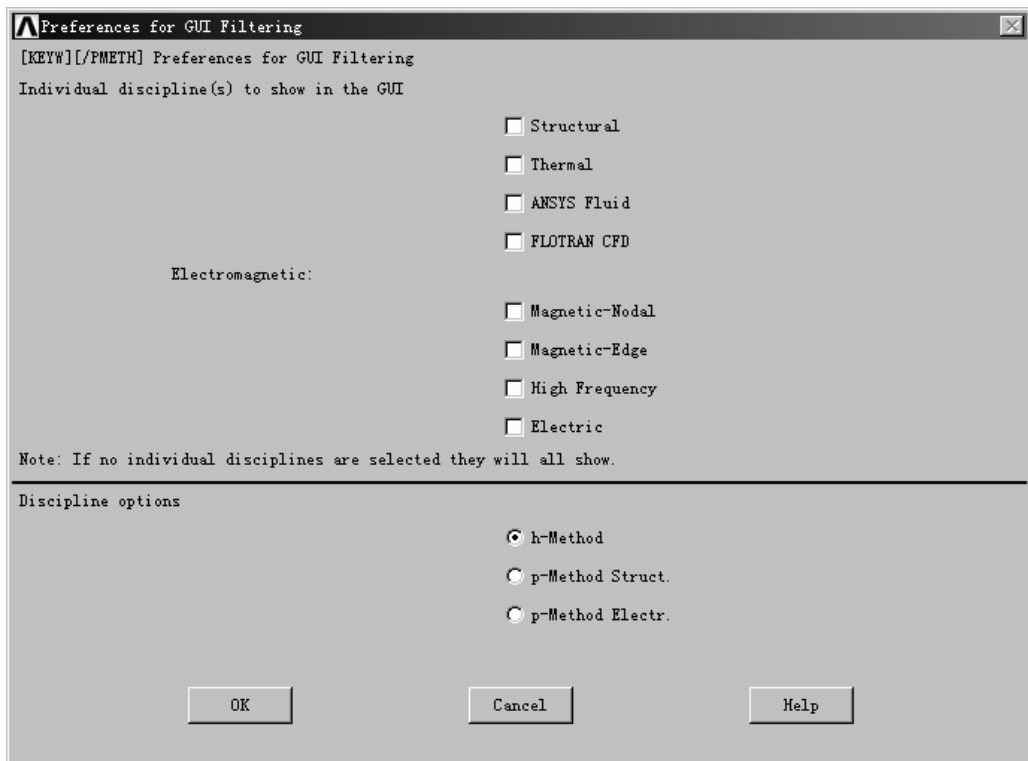


图 1-12 使用偏好

2. 分析功能

主菜单中大多数功能相对于其他功能都是模式化的，即用户必须在开始下一个功能前完成上一个功能。例如，如果要在工作区域建立关键点，那么用户就不能同时建立线或者网格化体积。具体的主菜单分析功能随具体的软件版本和分析而不同。

3. 会话编辑器（Session Editor）

分析过程中，用户可以在其中修改或者删除最后保存或者回复的命令。用户可以使用会话编辑器（图 1-13）完成以下操作：

- ① **OK**：将窗口中的内容输入。完成命令修改之后，单击此按钮输入；
- ② **Save**：保存窗口中的内容；
- ③ **Cancel**：离开窗口返回；
- ④ **Help**：获得关于 UNDO 命令的帮助。

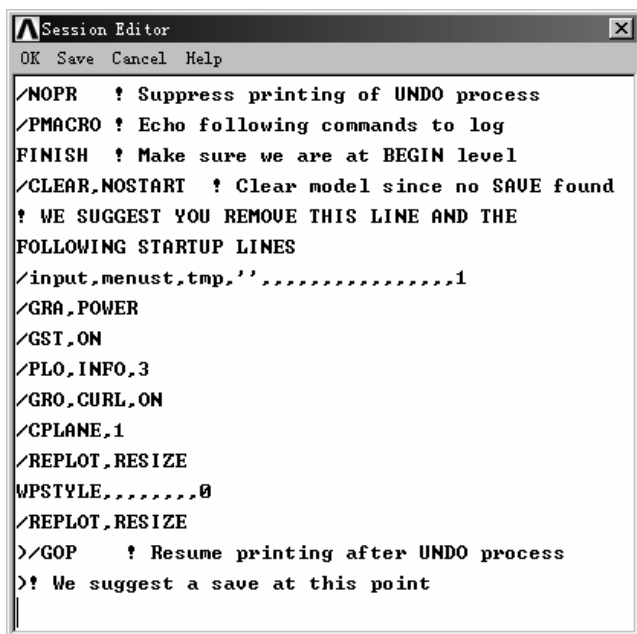


图 1-13 会话编辑器

4. 完成 (Finish)

退出当前处理器，返回起始层。

1.5.4 ANSYS 状态栏

状态栏位于主窗口的下部 (图 1-14)，状态栏显示当前使用的层次、材料、单元、实常数 and 坐标系统。

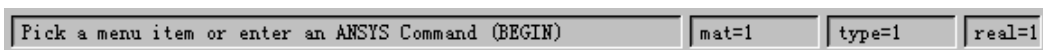


图 1-14 状态栏

1.5.5 ANSYS 命令输入窗口

命令输入窗口位于主窗口上部 (图 1-15)，其中可以输入 ANSYS 的命令，对于大多数模型，命令流输入模式比 GUI 更加方便快捷。在命令输入过程中会有命令提示帮助用户完成输入，而且，单击命令输入窗口左侧的键盘按钮，可以显示弹出的命令输入窗口，这里，用户不仅可以得到命令提示，还可以看到输入历史 (图 1-16)。



图 1-15 命令输入窗口

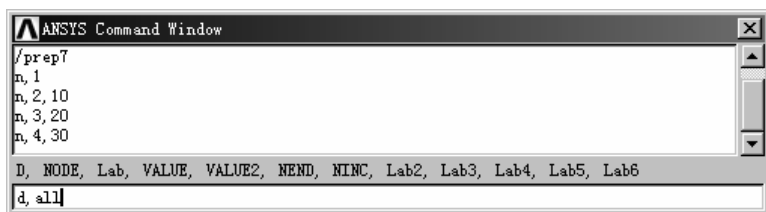


图 1-16 弹出的命令输入窗口

1.5.6 ANSYS 图形显示窗口

图形显示窗口就是主窗口中间最大的区域（图 1-17）。图形窗口有检查各种不同图形的用处，包含模块的建立、结果的显示等。

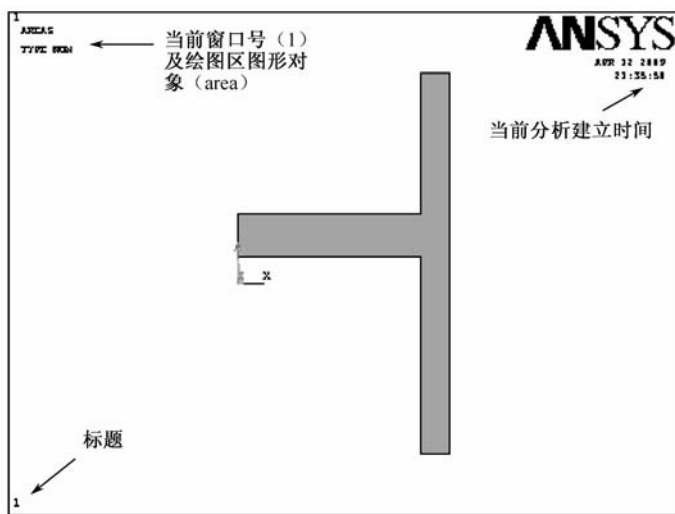


图 1-17 图形显示窗口

1.5.7 ANSYS 工具栏

工具栏包括了用户常用的几个按钮，如保存、恢复数据、退出等命令（图 1-18）。单击右上角箭头图标可以隐藏工具栏（图 1-19）。

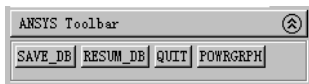


图 1-18 工具栏



图 1-19 隐藏的工具栏

1.5.8 ANSYS 图像控制按钮

图像控制按钮可以控制有限元模型的显示模式（图 1-20）。

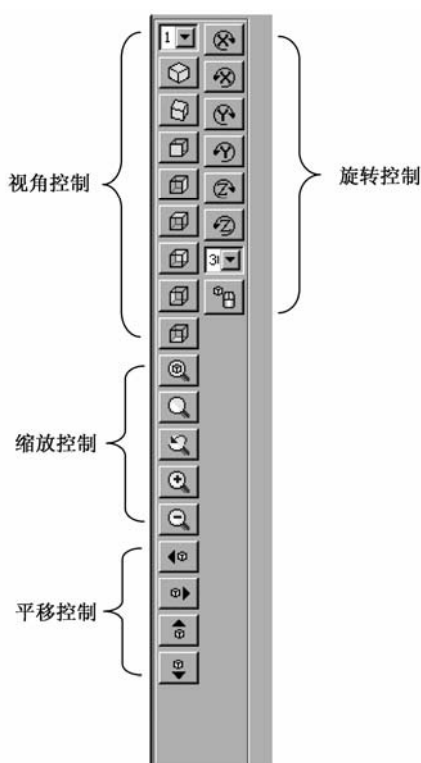


图 1-20 图像控制按钮

1.6 ANSYS 架构

本节首先介绍 ANSYS 架构，各个层次之间的关系，然后通过 GUI（图形用户界面）和命令形式介绍各个层次的转换方法。

1.6.1 ANSYS 架构简介

ANSYS 分两个层次（Level）：起始层（Begin Level）和处理器层（Processor Level）。

（1）起始层

用户刚刚打开 ANSYS 时进入的层次就是起始层，在起始层，用户可以进行进入和退出 ANSYS 的操作，还可以进行其他全局性的操作，例如，进入处理器层，清除现在所有操作，复制二进制文件，开始一个新的项目和改变文件名称等操作。

（2）处理器层

一般来说，用户可以通过 ANSYS 图形用户界面（GUI）中的主菜单（ANSYS Main Menu）选择进入处理器层的某一处理器。或者，用户也可以使用命令形式进入处理器层的某一处理器，其格式是/名称，其中名称就是进入的处理器名称。处理器主要的功能在于接受相关类型目的工作的命令，故在每一个不同处理器都有其相对应的命令来完成，也可将处理器视为解决问题步骤中的组合命令。ANSYS 的常用处理器、功能、GUI 路径及其命令参见表 1-1，各个处理器与起始层的关系如图 1-21 所示。

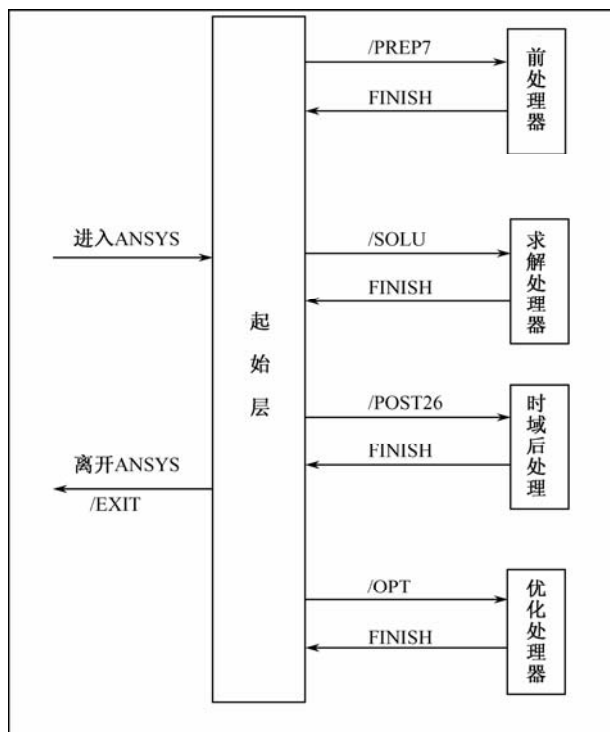


图 1-21 各个处理器与起始层的关系

表 1-1 ANSYS 的常用处理器

处 理 器	功 能	GUI 路径	命 令
一般前处理器 PREP7	建立有限元模型（几何形状、材料等），任何分析都会使用该处理器	Main Menu→Preprocessor	/PREP7
求解处理器 SOLUTION	施加负，求解。任何分析都会使用该处理器	Main Menu→Solution	/SOLU
一般后处理器 POST1	查看整个模型在指定的时间点上的结果，一般用于静态结构分析、模态分析，屈曲分析的结果	Main Menu→General Postproc	/POST1
时域后处理器 POST26	查看作为时间的函数的模型在一些点的值。用于动态结构分析后，查看动态分析与时间有关的时域结果	Main Menu→TimeHist Postpro	/POST26
优化处理器 OPT	优化原始设计，处理最佳化问题，定义目标函数，限制函数	Main Menu→Design Opt	/OPT

1.6.2 有关操作

1. /PREP7

只在起始层（Begin Level）有效，功能是由起始层进入一般前处理器（General Preprocessor），以便于建立有限元节点、元素模型。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor (图 1-22)

2. FINISH

离开任何处理器回到起始层。对于 ANSYS 处理器, 数据库中的数据将会保持不变, 但是数据库不会自动写入文件, 用户需要使用 SAVE 命令把数据库写入文件。

菜单操作:

Main Menu→Finish (图 1-23)

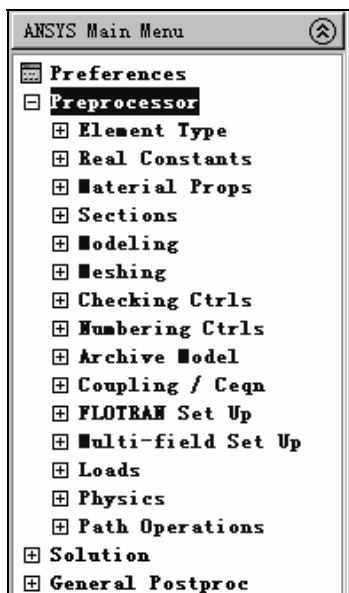


图 1-22 进入一般前处理器



图 1-23 离开任意处理器回到起始层

3. /SOLU

由起始层进入求解处理器, 以便定义结构有限元模型的负载, 进行求解。

菜单操作:

Main Menu→Solution (图 1-24)

4. /POST1

由起始层进入一般后处理器, 以便检查分析结果。

菜单操作:

Main Menu→General Postproc (图 1-25)

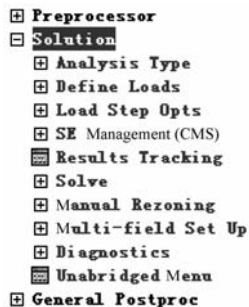


图 1-24 由起始层进入求解处理器

5. /EXIT, Slab, Fname, Ext, --

由起始层离开 ANSYS。

Slab: 离开时工作文件保存方式。

MODEL: 保存模型数据 (实体模型、有限元模型、负载的资料、默认)。

SOLU: 保存模型数据和结果数据（节点和元素结果）。

ALL: 除上述之外，再加上在后处理器对解答的处理结果。

NOSAVE: 所有更改资料不保存。

菜单操作:

Main Menu→File→Exit (图 1-26)

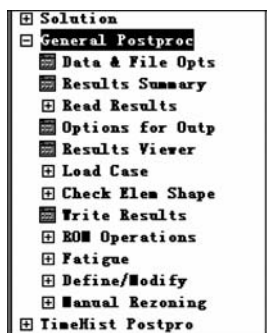


图 1-25 由起始层进入一般后处理器

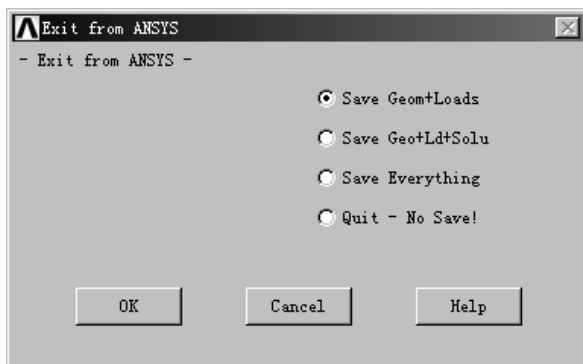


图 1-26 离开 ANSYS

读者可以在输入窗口中输入上述命令，然后观察每个命令执行后的状况。可以发现，状态栏实时地显示着系统所在层次。

1.7 ANSYS 文件

ANSYS 中有许多种文件，为了更好的利用 ANSYS，熟悉各种文件是十分重要的。同时，文件的操作也是一项重要工作。本节介绍了 ANSYS 的各种类型的文件和文件操作方法。

1.7.1 ANSYS 文件简介

为数据存取，ANSYS 读写很多文件，文件形式：文件名.后缀。文件名默认是任务名，用户可以在进入 ANSYS 时通过选择 Utility Menu→File→Change→Jobname（或者用 /FILNAME 命令）来设定任务名。默认任务命名为 file，后缀是一个唯一的标识 ANSYS 文件内容的标识符。例如，Jobname.DB 是数据库文件，Jobname.EMAT 是元素矩阵文件。参见表 1-2。

表 1-2 ANSYS 文件

文件类型	文件名	文件格式
日志文件	Jobname.LOG	ASCII
错误文件	Jobname.ERR	ASCII
输出文件	Jobname.OUT	ASCII
数据库文件	Jobname.DB	二进制

续表

文件类型	文件名	文件格式
结果文件	Jobname.xxx	二进制
结构场或耦合场	Jobname.RST	
热场	Jobname.RTH	
磁场	Jobname.RMG	
流体场	Jobname.RFL	
负载步文件	Jobname.Sn	ASCII
图形文件	Jobname.GRPH	ASCII（特殊格式）
元素矩阵	Jobname.EMAT	二进制

1. Jobname.LOG 文件

Jobname.LOG 文件在 ANSYS 中有特别重要的作用，因为它记录了用户完整的使用日志。用户一进入 ANSYS 此文件即打开，它记录用户所有操作，不论此操作使用 GUI 路径还是命令形式。用户可以读写 Jobname.LOG 文件。

ANSYS 程序不会覆盖此文件，而是在其后继续添加数据。如果用户改变任务名称，此文件不会改名。

2. Jobname.ERR 文件

该文件记录执行命令时所产生的错误信息，其中包含有限元模块的不正确或错误的命令。在交互模式下，错误的原因在输出窗口中可以看到，但在非交互模式下，程序的不正常中止，就要靠此文件来检查错误所在，该文件也不具有覆盖功能。

1.7.2 文件操作

1. /FILNAME, Fname, Key

更改任务名称。更改后所有数据库将转换为新的任务文件名称，但 Jobname.LOG 文件及 Jobname.ERR 文件仍保留原工作文件名称。

菜单操作：

Utility Menu→File→Change Jobname

2. SAVE, Fname, Ext, --, Slab

保存所有数据库信息到一个文件中（File.DB）。在交互模式下，现存的 File.DB 文件首先写到一个备份文件（File.DBB）中。批处理模式下，现存的 File.DB 文件直接被现有数据取代，而不做备份。此命令最好适时应用以确保现有文件不会因为意外丢失。此命令可以在任意处理器中使用。

菜单操作：

Utility Menu→File→Save as

Utility Menu→File→Save as Jobname.db

3. RESUME, Fname, Ext, --, NOPAR, KNOPILOT

使用 RESUME 可以返回同版本 ANSYS 的数据库。只要用户使用同版本软件，那么文件就可以不经改变地恢复。而且，虽然不很保险，但是用户通常可以将旧版本的文件恢复到当前版本。

RESUME 对 File.DB 文件读入，返回到用户最后保存的文件（最后的 SAVE 操作）。

菜单操作：

Utility Menu→File→Resume from
Utility Menu→File→Resume Jobname.db

4. /CLEAR, Read

清除所有数据库资料。此命令将 ANSYS 数据库重置为任务初始状态。此命令只在起始层有效。初学者在做练习时，应该经常使用该命令以清除旧的任务，开始新的练习。

菜单操作：

Utility Menu→File→Clear & Start New

1.8 ANSYS 与 CAD 软件接口

采用其他 CAD 软件建模，可以方便的完成建模过程。许多 CAD 软件有直接与 ANSYS 进行数据传递的功能。以下软件均有与 ANSYS 的接口，如 AutoCAD, CADAM, CADKEY 和 Pro/ENGINEER。用户可以把模型保存为 IGES 文件格式，再把这个模型文件输入 ANSYS 中。导入 ANSYS 的方法为 File→Import。导出 ANSYS 的方法 File→Export...

下面介绍两种 AutoCAD 和 ANSYS 数据导入和导出方法。

1. 对于三维实体

AutoCAD:

File→Export...→保存类型选 ACIS(*.sat) →输入文件名→选三维实体 (3D object)

ANSYS:

File →Import→SAT...

优点：用 SAT 文件转换方便，而且一般不会有转换问题。

缺点：只能转换 3D object。

2. 用 IGES 格式文件交换

AutoCAD 12 自带输出 IGES 格式文件工具，AutoCAD14 要从 AutoDesk 网站下载转换工具。

ANSYS:

File→Import→SAT...

优点：各种实体类型都能转换。

缺点：转换麻烦，而且经常需要“TOPO and GEOM Repair”。

1.9 怎样学习 ANSYS

不管什么软件，最快的学习方法就是“从战争中学习战争”，ANSYS 也一样。如果是电学问题，就可以找一个电容之类的，熟悉一下整个流程，从建模，到定义材料，到划分网格，到计算，以及后处理等。当你能顺利算出结果来并且比较合理的时候，再在此基础上逐渐提高，如各种建模的技巧，各种找错误的技巧和方法等。

刚开始时，用户可能觉得用 GUI 比较方便，因为此方法比较直观。但是同时要注意 GUI 的对话框前面的 [] 里面的字母，那就是命令。当分析复杂问题时，GUI 很容易扰乱用户思路，因为 ANSYS 的 GUI 操作非常烦琐，所以，尝试着在一定时候进入使用命令流格式是非常必要的。

还有，就是 ANSYS 的帮助文件，尤其是里面有二百多个例子，不妨多看看、多学习这些例子，这样对提高自己的软件操作能力有很大帮助。

1.10 入门引例——正方形电流环分析

本节介绍一个正方形电流环的磁场分布分析，此问题是一个电磁耦合问题，希望可以借助此例让读者建立起 ANSYS 有限元分析的初步概念。



结果文件

——附带光盘 “End\Ch1\入门引例”



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch1\入门引例.avi”

1.10.1 问题描述

一个正方形电流环电流 I 置于空气中。求 P 点的磁通密度， P 点距离电流环的距离 b 如图 1-27 所示。

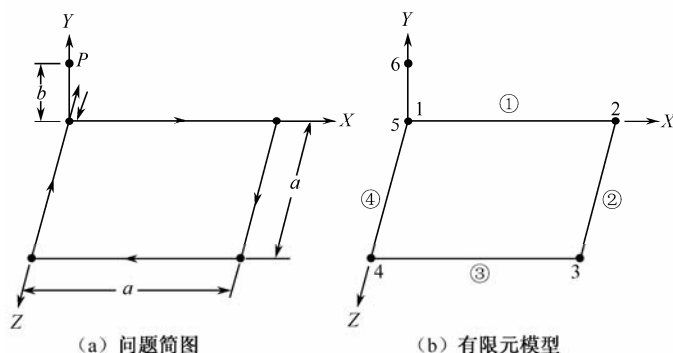


图 1-27 正方形电流环中的磁场分析

此问题中的参数参见表 1-3。

表 1-3 问题参数

材料性质	几何性质	载 荷
$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$	$a = 1.5 \text{ m}$	$I = 7.5 \text{ A}$
$\rho = 4.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	$b = 0.35 \text{ m}$	

这个问题需要电磁场耦合分析，也是本书的主要内容。使用 LINK68 单元创建环形导线中的电流场，此单元建立的电流场被用来计算 P 点处的磁场。

节点 5 和节点 1 重合以建立一个闭合导线环。设定节点 5 的电压为 0，同时在节点 1 施加电流 I （图 1-27）。

首先，求解计算导线环中的电流分布，然后，使用 BIOT 命令计算由电流场产生的磁场。

因为在求解过程中不需要导线的横截面积，所以可以输入任意设定，这里设置为 1.0。由于线单元的比奥-萨法儿（Biot-Savart）磁场积分非常精确，所以，正方形环的每一个边用一个单元就可以了。磁通密度通过磁场强度来计算，即 $B = \mu_0 H$ 。

此问题的理论值与 ANSYS 计算值比较参见表 1-4。

表 1-4 ANSYS 计算值与理论值比较

磁 通 密 度	目 标 值	ANSYS 计算值	比 率
$B_x (\times 10^6 \text{ Tesla})$	2.010	2.010	1.000
$B_y (\times 10^6 \text{ Tesla})$	-0.662	-0.662	1.000
$B_z (\times 10^6 \text{ Tesla})$	2.010	2.010	1.000

1.10.2 GUI 操作

1. 设定工作环境

（1）设定图形界面的使用偏好。选择路径 Main Menu→Preferences，弹出“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“Electric”（图 1-28），这样可以过滤不需要的图形工作菜单，简化后续操作。

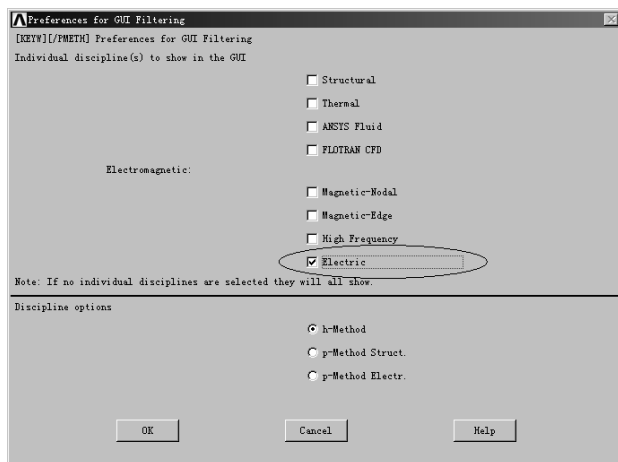


图 1-28 设定使用偏好

(2) 设定标题。选择路径 Utility Menu → File → Change Title，弹出的对话框中输入“MAGNETIC FIELD FROM A SQUARE CURRENT LOOP”（图 1-29），单击“OK”按钮。

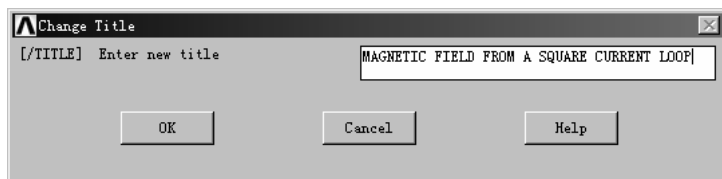


图 1-29 设定标题

2. 定义模型参数

(1) 定义单元类型。单元（Element）是 ANSYS 进行有限元计算使用的模型类型，可以根据维度分为点、线、面等各种维度的单元，也可以根据分析类型分为适用于结构场、热场、电场或磁场等的单元。设定好单元后，要对选定的单元引用号（Element Type reference number），后续分析中将使用此编号来选定单元。选择路径 Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete，弹出“Element Types”单元类型对话框，对话框开始显示“NONE DEFINED”（图 1-30），单击“Add...”按钮，弹出“Library of Element Types”单元类型库对话框（图 1-31），在此对话框左边栏中选择“Elec Conduction”，右边滚动栏中选择“3D Line 68”，对话框下面的“Element Type reference number”保持默认值“1”不变。单击“OK”按钮，定义了一个“LINK68”单元，且其单元引用号为“1”（图 1-32）。最后单击“Close”按钮，关闭单元类型对话框。

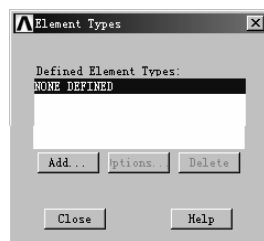


图 1-30 单元类型对话框

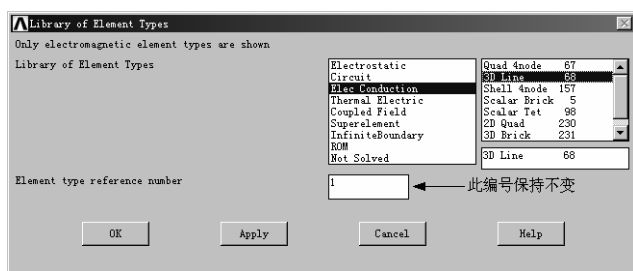


图 1-31 单元类型库对话框



图 1-32 定义的“LINK68”单元

(2) 定义材料属性。定义方形线圈的电阻，为简化分析，假设电阻为线性，与温度无关。材料编号（Material Model Number）为“1”。选择路径 Main Menu → Preprocessor → Material Props → Material Models，弹出“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框（图 1-33）。右边栏中双击“Electromagnetics → Resistivity → Constant”，弹出“Resistivity for Material Number 1”对话框定义材料的电阻（图 1-34）。在“RSVX”输入框中输入“4.0E-8”，单击“OK”按钮。单击“Material → Exit”退出（图 1-35）。

(3) 定义导线横截面积实常数。因为在求解过程中不需要导线的横截面积，所以可以输入任意设定，这里设为“1.0”。实常数编号设定为“1”。选择路径 Main Menu → Preprocessor

→Real Constants→Add/Edit/Delete, 出现“Real Constants”实常数对话框(图 1-36), 对话框开始显示“NONE DEFINED”, 单击“Add...”按钮, 出现“Element Types for Real Constants”实常数单元对话框(图 1-37), 在对话框中显示“Type 1 LINK68”, 选择此单元, 单击“OK”按钮, 出现“Real Constants Set Number 1, for LINK68”实常数编号 1, LINK68 对话框(图 1-38)。在“Cross-sectional area”横截面输入栏中输入“1”, 单击“OK”按钮, 回到“Real Constants”实常数对话框, 列出常数组 1(图 1-39)。

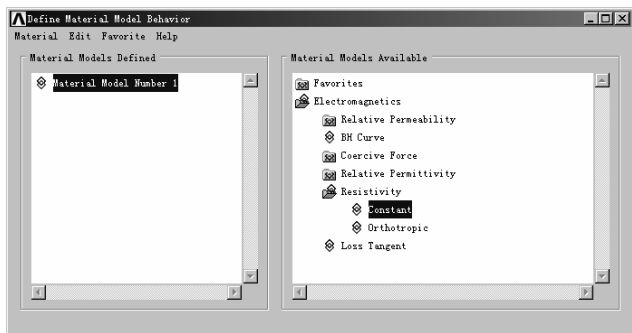


图 1-33 定义材料模型性质对话框

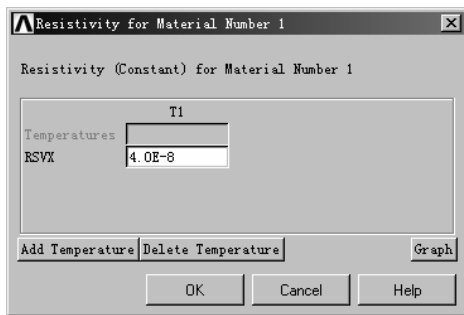


图 1-34 定义材料的电阻

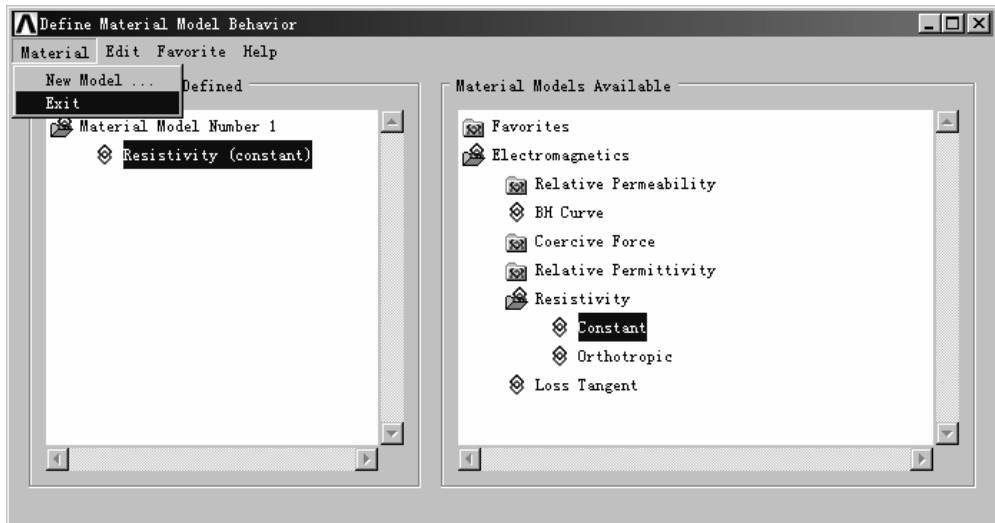


图 1-35 完成定义材料模型性质



图 1-36 实常数对话框

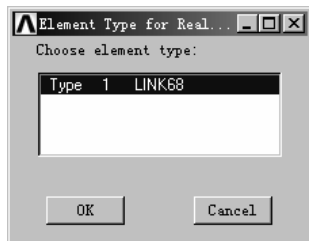


图 1-37 实常数单元对话框

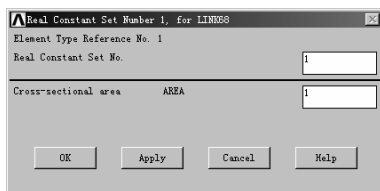


图 1-38 实常数编号 1, LINK68 对话框



图 1-39 列出常数组 1

3. 建立模型

问题模型简单, 所以采用自下而上的节点建模方法即可, 直接使用节点建模, 不需要再划分网格。

注意 之后采用自上而下的实体建模方法建模是需要划分网格的。

(1) 创建节点单元

创建节点方法 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS, 弹出“Create Nodes in Active Coordinate System”当前坐标系下建立节点对话框(图 1-40), 在“Node Number”栏中输入“1”。“Location in active CS”保持空白, 则系统默认其中填写坐标值为(0,0,0)。因为不需要选装, 所以“Rotation angles (degree)”不填。完成后, 因为要继续创建其他节点, 所以单击“Apply”按钮确定, 这样此对话框仍然处于打开状态, 如果单击“OK”按钮, 此对话框将会关闭。节点 2~6 的创建方法如图 1-40~图 1-45 所示。创建完节点 6 后, 单击“OK”按钮保存设置并关闭此对话框。

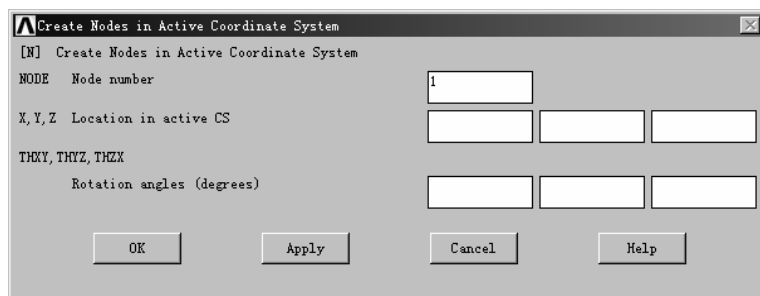


图 1-40 建立节点 1

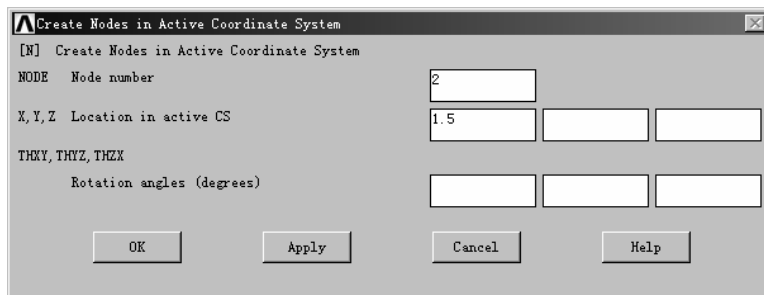


图 1-41 建立节点 2

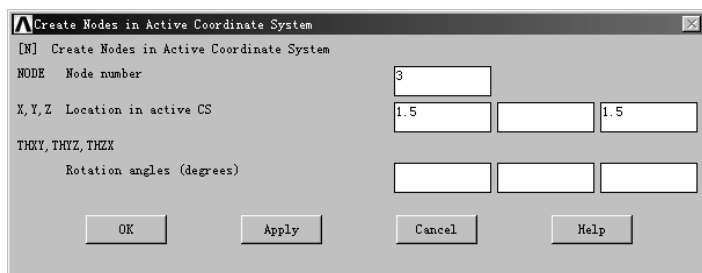


图 1-42 建立节点 3

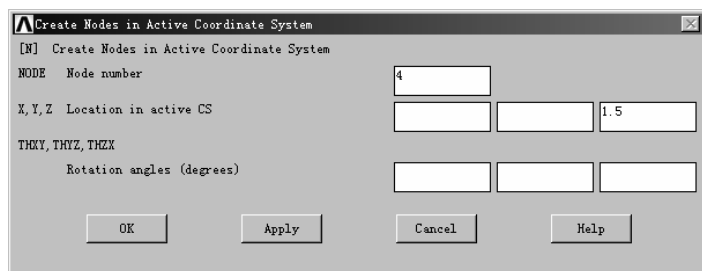


图 1-43 建立节点 4

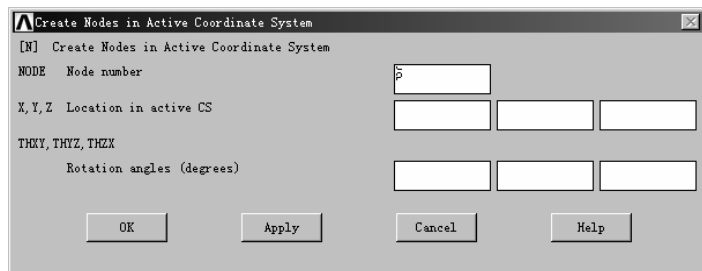


图 1-44 建立节点 5

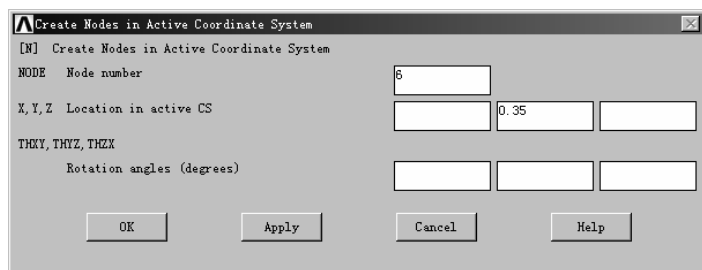


图 1-45 建立节点 6

(2) 改变视角

因为现在的视角方向限制，不利于模型的观看（图 1-46），所以读者可以改变视角方向。选择路径 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Pan, Zoom, Rotate**，弹出移动、缩放和旋转设置框（图 1-47），单击视角方向“iso”或者“Obliq”分别在（1,1,1）和（1,2,3）方向上观察模型。结果分别如图 1-48 和图 1-49 所示。也可以使用 ANSYS 右侧的图形控制按钮来设定视角（图 1-50）。

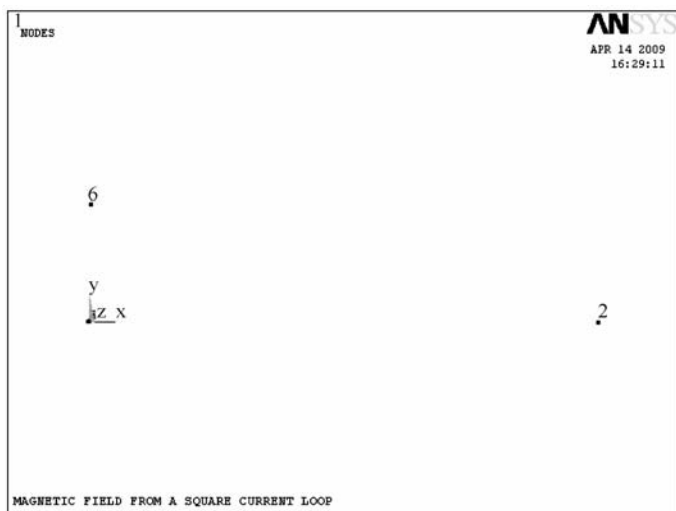


图 1-46 没有改变视角时的模型

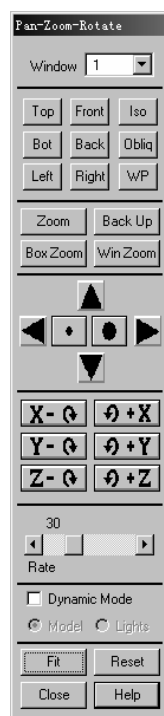
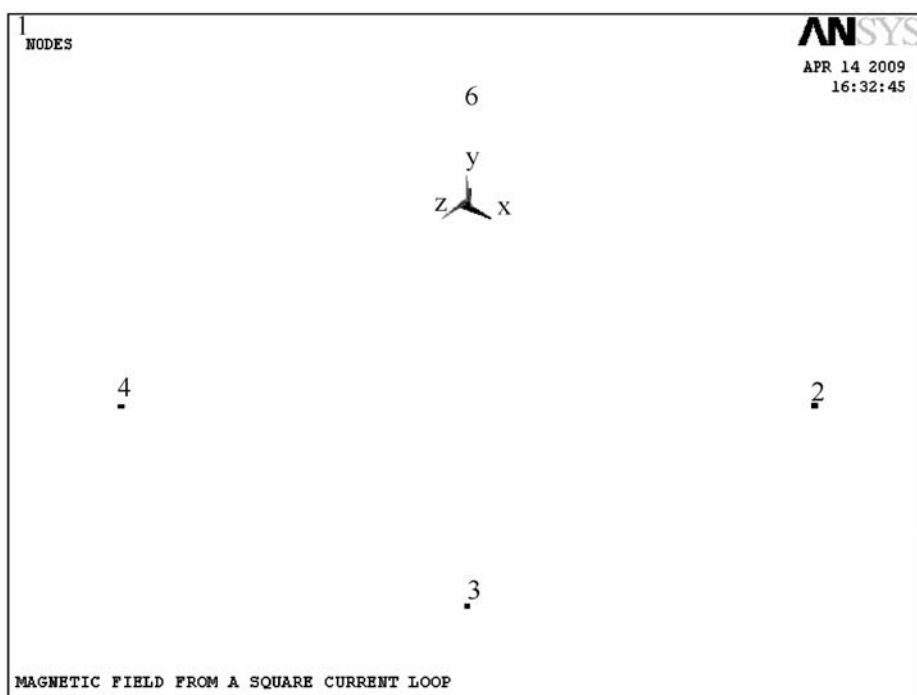
图 1-47 移动、缩放
和旋转设置框

图 1-48 视角方向“iso”

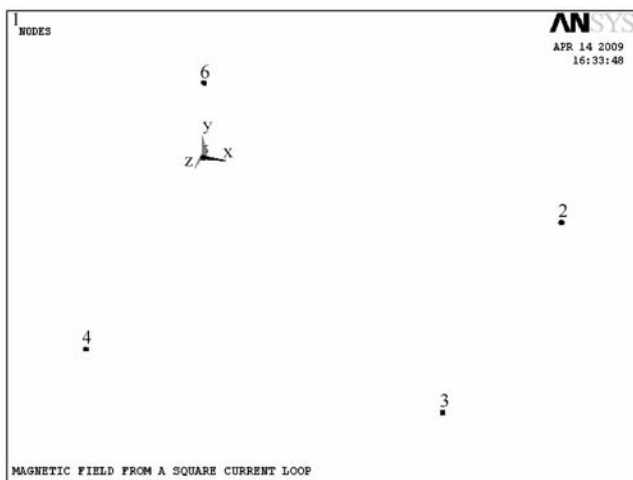


图 1-49 视角方向“Obliq”

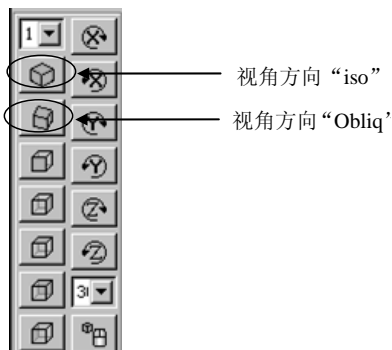


图 1-50 图形控制按钮来设定视角

(3) 创建导线单元

导线单元连接节点。导线单元采用上面已建立的材料、单元来建立。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Elements**→**Auto Numbered**→**Thru Nodes**，弹出节点拾取框（图 1-51），确保拾取状态是“Pick”，然后在图形界面上选取节点 1 和节点 2，或者选择“List of Items”，直接在其中的输入框中输入“1,2”，单击“Apply”按钮完成，然后用同样方法建立连接其他节点的导线。

当建立完第一条导线后，也可以采用复制单元的方法来建立其他导线。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Copy**→**Elements**→**Auto Numbered**，弹出单元拾取框，在图形界面上拾取单元 1，单击“OK”按钮，或者在输入框中输入“1”（图 1-52）。弹出“Copy Elements (Automatically-Numbered)”复制单元对话框（图 1-53），在“Total number of copies”输入栏中输入“4”，单击“OK”按钮，得到如图 1-54 所示模型。

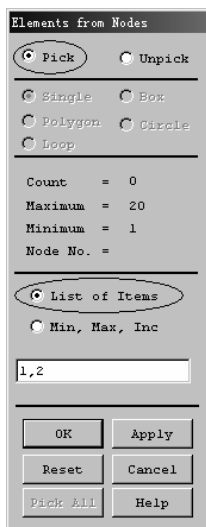


图 1-51 节点拾取框

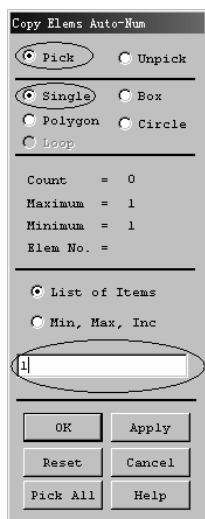


图 1-52 单元拾取框

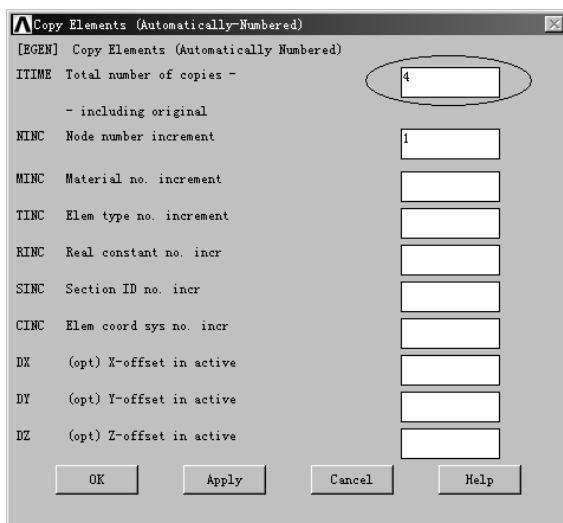


图 1-53 复制单元对话框

4. 施加载荷

(1) 施加电压。选择路径 Main Menu → Solution → Define Loads → Apply → Electric → Boundary → Voltage → On Nodes, 弹出节点拾取框, 在图形界面上拾取节点 5, 或者可以直接在拾取框中输入“5”(图 1-55), 单击“OK”按钮, 弹出“Apply Voltage On nodes”施加节点电压对话框(图 1-56)在“Load VOLT value”输入栏中输入“0”, 单击“OK”按钮, 由此可以给节点 5 施加 0V 电压。

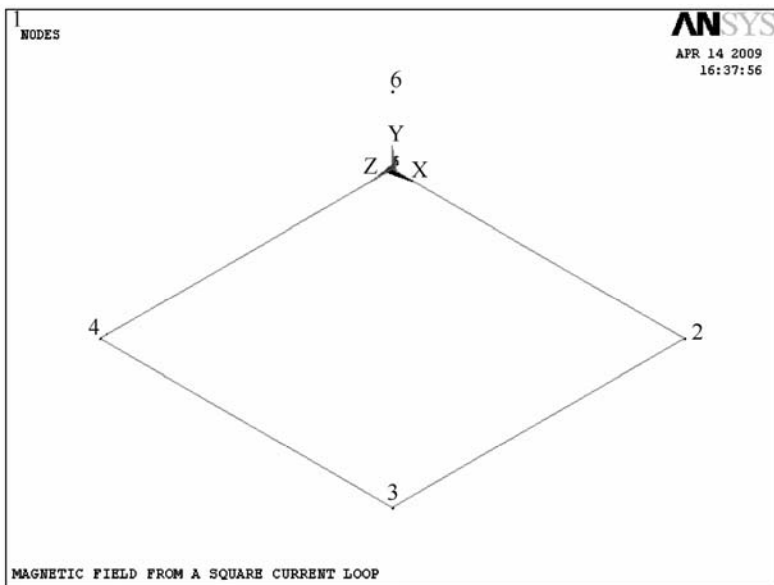


图 1-54 导线单元模型

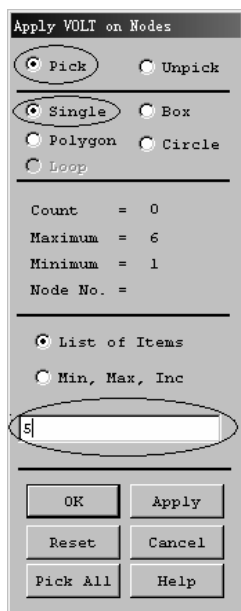


图 1-55 节点拾取框

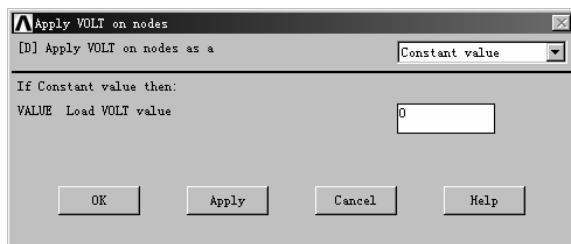


图 1-56 施加节点电压

(2) 施加电流。选择路径 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Excitation→AppCurrent→On Nodes, 弹出节点拾取框, 在图形界面上拾取节点 1, 或者直接在拾取框的输入栏中输入“1”。单击“OK”按钮, 弹出“Apply AMPS On nodes”给节点施加电流对话框, 在“Load AMPS value”输入栏中输入“7.5”, 单击“OK”按钮, 由此可以给节点 1 施加 7.5A 的电流载荷(图 1-57)。

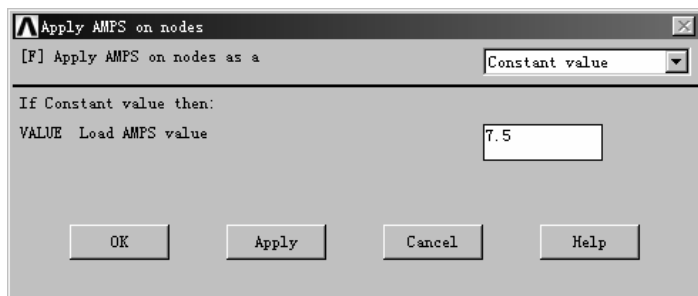


图 1-57 施加节点电流

(3) 数据库和结果文件输出控制。选择路径 Main Menu→Solution→Load Step Opts→OutputCtrls→DB/Results File, 弹出“Controls for Database and Results File Writing”数据库和结果文件输出控制对话框(图 1-58)。在“Item to be controlled”后的下拉菜单中选择“Element solution”, 检出并确认在“File write frequency”下面的单选框中选择了“Last substep”, 单击“OK”按钮, 把最后一步的单元求解结果写到数据库中。

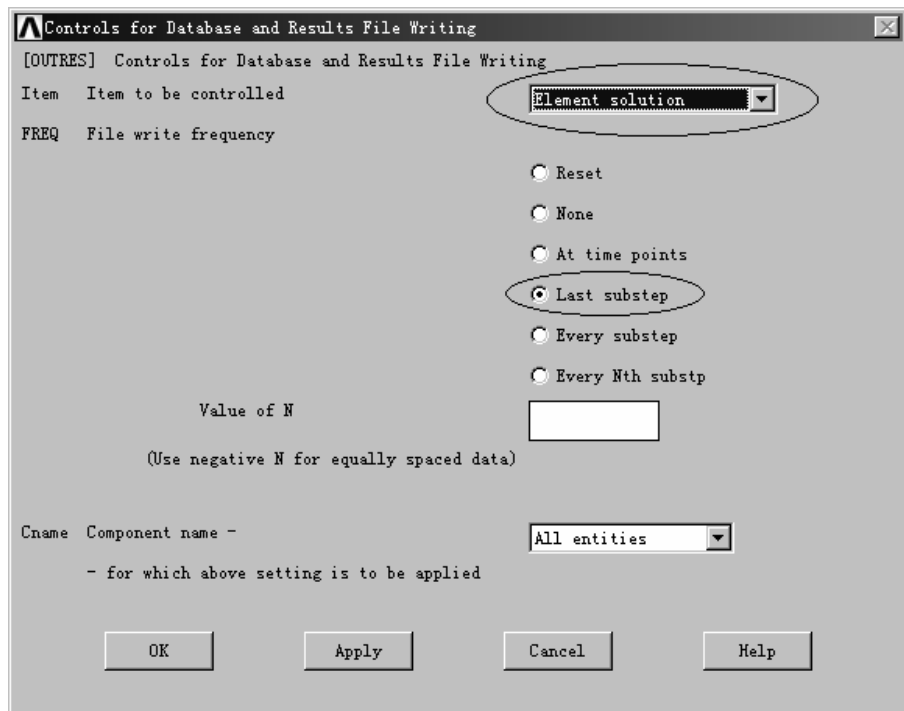


图 1-58 数据库和结果文件输出控制对话框

5. 求解

首先求解计算导线环中的电流分布，然后使用 BIOT 命令计算由电流场产生的磁场。

(1) 计算导线环中的电流分布。选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，弹出一个状态显示窗口（图 1-59）和“Solve Current Load Step”求解当前载荷步对话框（图 1-60）。确认后，单击求解对话框“OK”按钮开始求解，直到提示“Solution is done”求解结束。

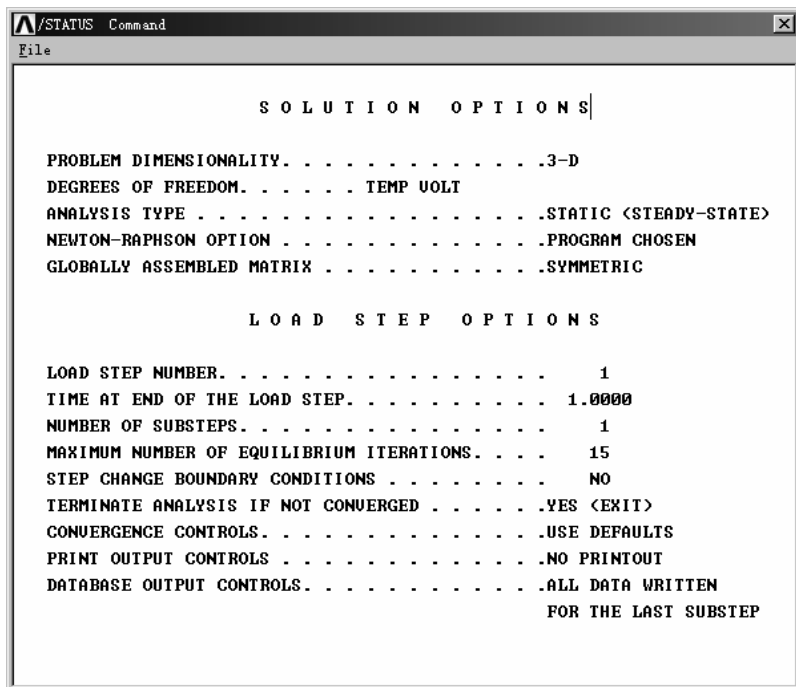


图 1-59 状态显示窗口



图 1-60 求解当前载荷步对话框

(2) 计算由电流场产生的磁场。选择路径 Main Menu→Solution→Load step Opts→Magnetics→Options Only→Biot-Savart，在弹出的对话框中选择“New”，单击“OK”按钮确认求解比奥-萨法尔磁场积分。

6. 查看计算结果

(1) 查看节点 6 磁场强度。因为磁场强度是矢量，所以 ANSYS 分别用 X,Y,Z 三个方向的值来表达该矢量。选择路径 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data，弹出“Get Scalar Data”获取标量数据对话框（图 1-61），在左边选取栏中选择“Results data”，在右边选择

“Nodal results”，单击“OK”按钮，弹出“Get Nodal Results Data”获得节点结果数据对话框（图 1-62）。在“Name of parameter to be defined”所定义参数名称栏中输入“hx”，在“Node number N”中输入“6”，即获得节点 6 的数据。在“Results data to be retrieved”后面的栏中，左侧栏选择“Flux & gradient”，右侧栏选择“Mag source HSX”，单击“Apply”按钮，即将节点 6 由电流环产生的磁场的 X 方向的磁场强度 HSX 赋给了定义的参数“hx”。同样方法获得节点 6 由电流环产生的磁场的 Y 和 Z 方向的磁场强度 HSY 和 HSZ，并将它们分别赋给定义的参数“hy”和“hz”。

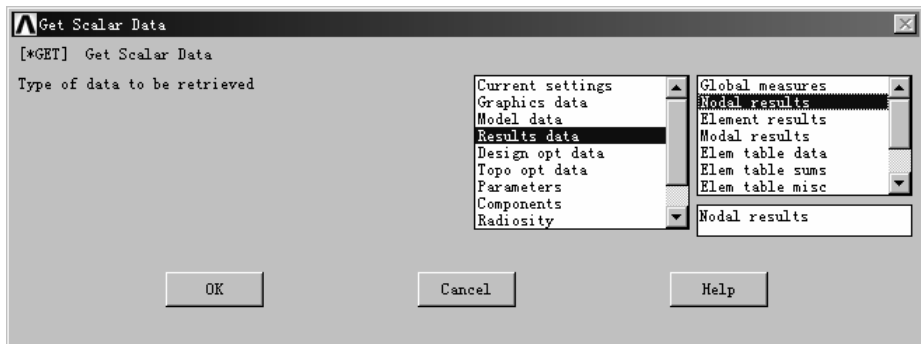


图 1-61 获取标量数据对话框

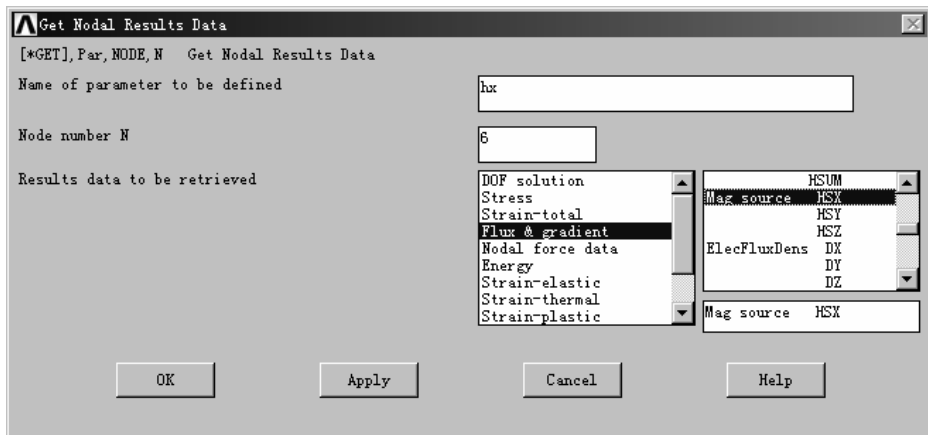


图 1-62 获得节点结果数据对话框

(2) 定义真空磁导率和磁通密度。因为，ANSYS 中没有现成的命令可以直接得到由电磁感应产生的磁场的磁通密度，所以用户需要先定义真空中的磁导率，然后由计算得到磁通密度。选择路径 Utility Menu→Parameters→Scalar parameters，弹出“Scalar Parameters”标量参数对话框，在“Selection”输入栏输入 MUZRO=1.25664E-6（真空磁导率），单击“Accept”按钮，然后在“Selection”输入栏依次输入：

$$BX=MUZRO*HX$$

$$BY=MUZRO*HY$$

$$BZ=MUZRO*HZ$$

单击“Accept”按钮确认，单击“Close”按钮关闭，其输入参数如图 1-63 所示。



图 1-63 标量参数对话框

(3) 查看所有参数选择路径 Utility Menu→List→Status→Parameters→All Parameters, 如图 1-64 所示。

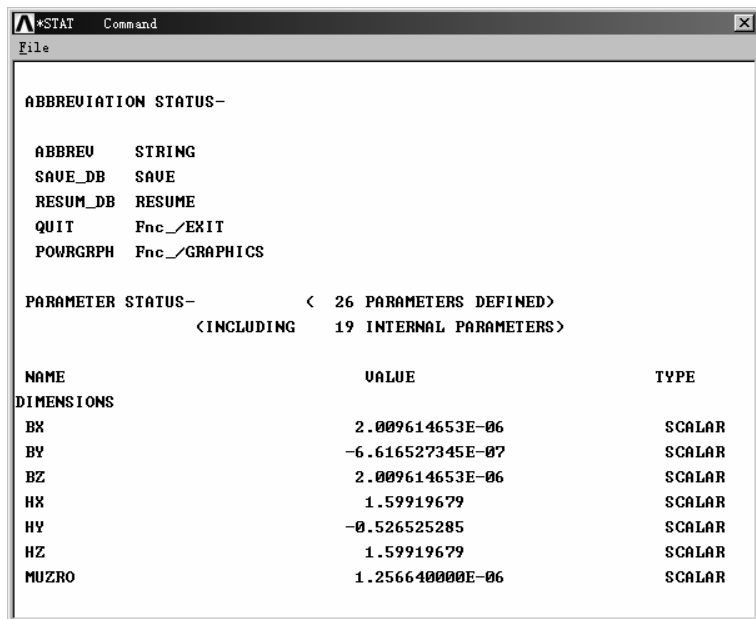


图 1-64 所有参数列表

(4) 对比理论值与 ANSYS 的计算值

定义数组选择路径 Utility Menu→Parameters→Array parameters→Define/Edit, 弹出“Array Parameters”数组参数对话框(图 1-65), 单击“Add...”按钮弹出“Add New Array Parameter”增加新数组参数对话框, 在“Parameter name”输入栏输入“LABEL”, “Parameter type”后面单选框选择“Character Array”, “No. of rows, cols, planes”后面三个输入栏中分别输入“3,2,0”, 单击“Apply”按钮。这样就定义了一个名为 LABEL 的三行两列的字符数组图(图 1-66)。

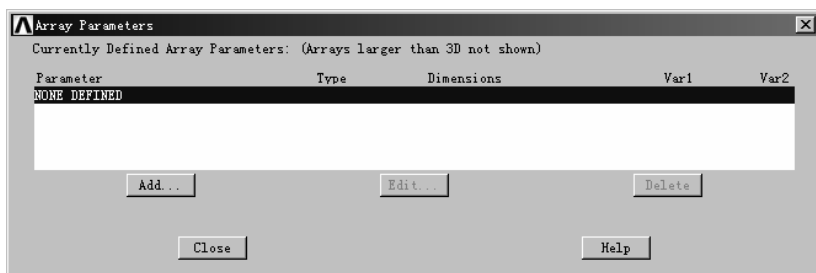


图 1-65 数组参数对话框

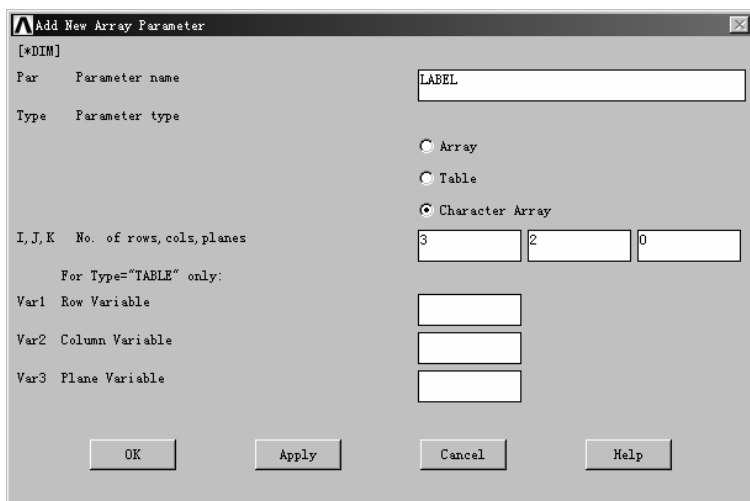


图 1-66 定义 LABEL 数组

用同样方法定义一个三行三列数组“VALUE”（图 1-67）。完成后，“Array Parameters”对话框显示如图 1-68 所示。

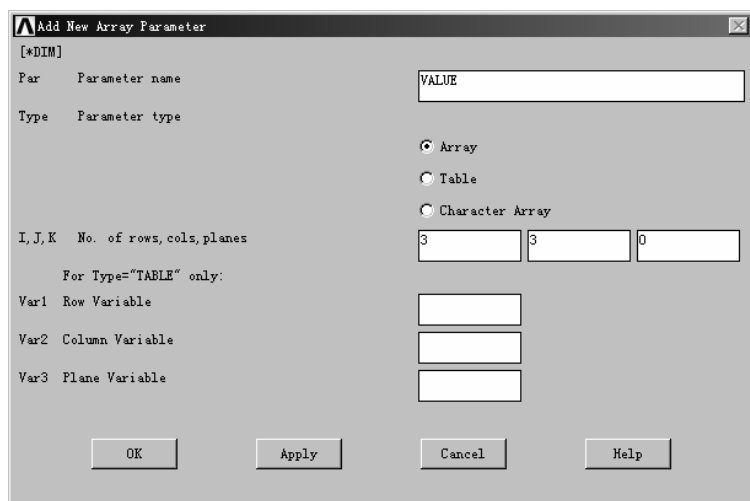


图 1-67 定义 VALUE 数组

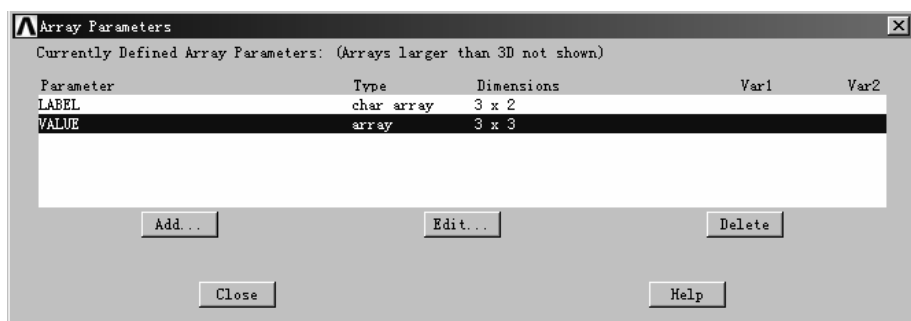


图 1-68 数组参数对话框

然后给数组赋值，即把理论值、计算值和比率赋值给一般数组，把文字标识赋值给字符数组。这部分操作很多不能通过 GUI 完成，所以，只能使用命令流形式，而且还有部分命令甚至不能通过命令窗口输入，所以，用户最好通过 session editor 输入。

```

LABEL(1,1) = 'BX','BY','BZ'           ! 名称
LABEL(1,2) = 'TESLA','TESLA','TESLA'  ! 单位特斯拉
*VFILL,VALUE(1,1),DATA,2.010E-6,-.662E-6,2.01E-6  ! 第一列数据
*VFILL,VALUE(1,2),DATA,BX,BY,BZ        ! 第二列数据
*VFILL,VALUE(1,3),DATA,ABS(BX/(2.01E-6)),ABS(BY/.662E-6),ABS(BZ/(2.01E-6)) ! 第三列数据
/COM
/OUT,EX1,vrt                           ! 输出以下内容 EX1.vrt

/COM,----- EX1 RESULTS COMPARISON -----
/COM,
/COM,          |  TARGET    |  ANSYS    |  RATIO
/COM,
*VWRITE,LABEL(1,1),LABEL(1,2),VALUE(1,1),VALUE(1,2),VALUE(1,3)
(1X,A8,A8,'  ',F12.9,'  ',F12.9,'  ',F5.3)
/COM,-----
/OUT
! 输出内容结束
FINISH

```

EX1.vrt 内容如下：

```

----- EX1.vrt RESULTS COMPARISON -----

          |  TARGET    |  ANSYS    |  RATIO

BX    TESLA    0.000002010  0.000002010  1.000
BY    TESLA   -0.000000662 -0.000000662  0.999
BZ    TESLA    0.000002010  0.000002010  1.000

```

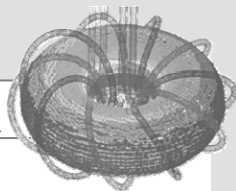
1.10.3 命令流操作

```

/PREP7
/TITLE, MAGNETIC FIELD FROM A SQUARE CURRENT LOOP
ET,1,LINK68                                ! LINK68 单元
R,1,1                                       ! 任意面积
MP,RSVX,1,4.0E-8                          ! 电阻率
N,1                                         ! 定义电流环上的节点
N,2,1.5
N,3,1.5,,1.5
N,4,,,1.5
N,5                                         ! 节点 1 和 5 重合
N,6,,,35                                  ! 为单看结果定义的节点
E,1,2                                      ! 创建单元
EGEN,4,1,-1
D,5,VOLT,0                                ! 接地
F,1,AMPS,7.5                              ! 施加电流激励源
FINISH
/SOLU
OUTPR,ESOL,LAST                            ! 输出控制
SOLVE                                      ! 求解电流场
BIOT,NEW                                  ! 使用比奥-萨法儿积分计算 HS
*GET,HX,NODE,6,HS,X                       ! 获取 HS(X)
*GET,HY,NODE,6,HS,Y                       ! 获取 HS(Y)
*GET,HZ,NODE,6,HS,Z                       ! 获取 HS(Z)
MUZRO=12.5664E-7                          ! 定义真空磁导率
BX=MUZRO*HX                              ! 计算磁通密度
BY=MUZRO*HY
BZ=MUZRO*HZ
*status,parm                              ! 显示参数状态
*DIME,LABEL,CHAR,3,2
*DIME,VALUE,,3,3
LABEL(1,1)='BX','BY','BZ'                ! 名称
LABEL(1,2)='TESLA','TESLA','TESLA'       ! 单位特斯拉
*VFILL,VALUE(1,1),DATA,2.010E-6,-.662E-6,2.01E-6 ! 第一列数据
*VFILL,VALUE(1,2),DATA,BX,BY,BZ          ! 第二列数据
*VFILL,VALUE(1,3),DATA,ABS(BX/(2.01E-6)),ABS(BY/.662E-6),ABS(BZ/(2.01E-6)) ! 第三列数据
/COM

```

```
/OUT,EX1,vrt                                ! 输出以下内容 EX1.vrt
/COM,----- EX1 RESULTS COMPARISON -----
/COM,
/COM,          |   TARGET   |   ANSYS   |   RATIO
/COM,
*VWRITE,LABEL(1,1),LABEL(1,2),VALUE(1,1),VALUE(1,2),VALUE(1,3)(1X,A8,A8,' 'F12.9,' 'F12.9,' 'F5.3)
/COM,-----
/OUT
! 输出内容结束
FINISH
```



第2章 结构场分析

为了使读者更好地了解 ANSYS 的使用方法，本章简要介绍 ANSYS 结构场分析的典型步骤，同时，让读者初步了解 ANSYS 有限元分析的通用步骤和方法。首先介绍了如何建立有限元模型，划分网格的基本方法，然后加载负载，使用 ANSYS 仿真结果。最后介绍了分析报告的基本写法。通过本章学习，读者可以熟悉有限元分析的通用步骤，一些常用的命令和菜单操作，为以后学习复杂的电磁耦合分析打下良好的基础。



本章内容

- 建立有限元模型
- 划分网格
- 加载负载
- 求解
- 后处理器



本章案例

- 定义单元类型，材料属性
- 两端固定杆件建模
- 两端固定杆件求解及结果查看
- 梁应力及变形分析

2.1 为什么先学习结构场分析

ANSYS 初期主要应用于结构场分析，所以，其结构场分析功能强大，命令语句有很深的结构场分析痕迹，例如，Loads、D (Degree of Freedom) 等，大多数有限元书籍也是针对结构分析或者使用结构分析为例的，而且本书介绍耦合场分析时，也会涉及结构场分析内容，所以，为了使读者更好的理解 ANSYS 的操作及其背后的有限元原理，本章首先介绍基本的结构场分析步骤，这里重点介绍各个场分析中通用的操作，对只针对结构场的操作不做特别讲述。

2.2 建立有限元模型

相对于有限元分析的其他部分，建立有限元模型需要用户更多的时间。首先，用户需要制定工作名称和分析标题。然后，在 **PREP7** 一般前处理器中定义单元种类、单元实常数、材料特性和几何模型。

2.2.1 有限元模型简介

结构场分析中，建立有限元模型（**Finite Element Modeling**）就是将结构（如机械结构）转换成由节点（**Node**）和单元（**Element**）组成的模型，此模型的外形和机构外形一致。有限元建模的方法有两种：实体建模（**Solid Modeling**）和直接建模（**Direct Generation**）。使用实体建模方法，用户设定模型的几何形状，然后命令 **ANSYS** 程序自动采用节点和单元网格化几何模型（图 2-1）。用户可以控制程序生成的单元的大小和形状。使用直接建模方法，用户手动定义每个节点的位置和单元的连接（图 2-2）。有一些方便的操作可以简化用户操作，例如，复制已有节点和单元的形状、对称反射等。

由图 2-1 可以看出，直接建模法适用于简单几何外形的结构系统，所需的节点、单元数目较少。相对而言，实体建模法适用于节点、元素数目较多的复杂几何外形机械结构系统。像计算机绘图软件一样，**ANSYS** 支持用户通过点、线、面、体先建立结构的几何外形，再对模型网格化（**Meshing**）。

当然，用户也可以综合使用直接建模法和实体建模法。

2.2.2 定义工作名称和分析标题

这部分不是分析所必须的，但是强烈建议用户能这样做。

1. 定义工作名称

工作名称用来识别 **ANSYS** 所做工作。当为某项分析定义了工作名称，工作名称就成为分析过程中产生的所有文件名的第一部分（文件名）。（这些文件的扩展名是文件类型的标识，如 **.DB**）通过为每一次分析定义工作名称，可确保文件不被覆盖。



如果没有指定作业名，所有文件的文件名均为 **FILE** 或 **file**，这取决于所使用的操作系统。

有两种方法可以改变默认的工作名称：

（1）进入 **ANSYS** 程序时通过入口选项修改工作名称。可以通过 **ANSYS Launcher**（图 2-3）或者使用 **ANSYS** 执行命令（在 **UNIX** 或者 **MS-DOS** 系统下使用）。

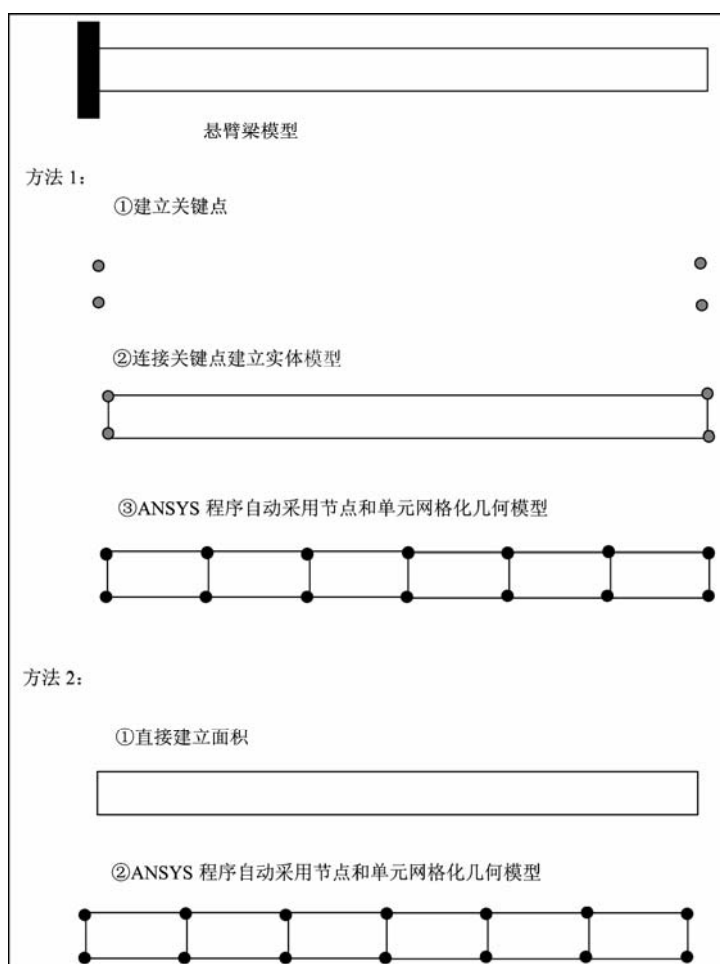


图 2-1 实体建模方法

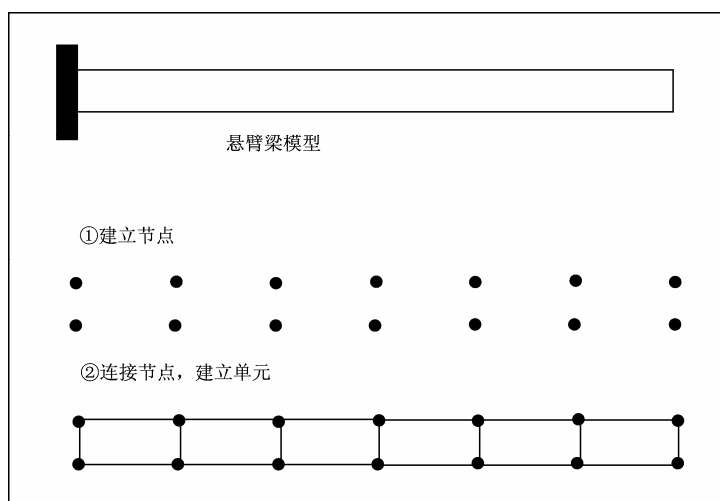


图 2-2 直接建模方法

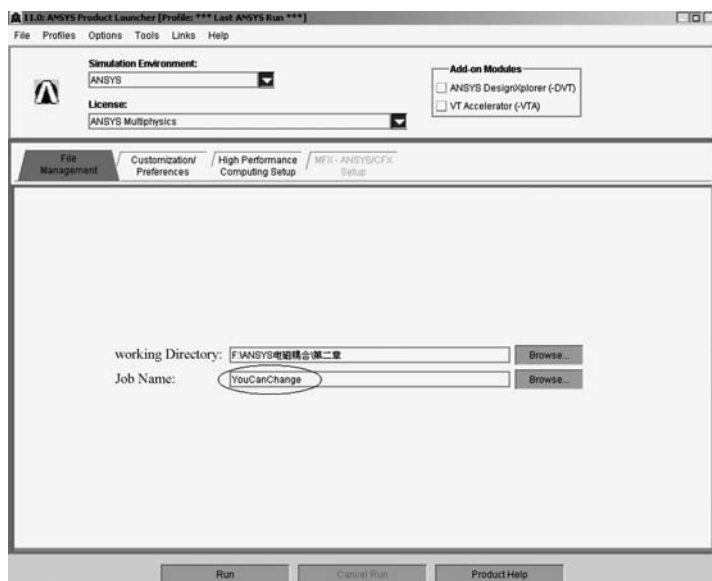


图 2-3 通过 ANSYS Launcher 修改工作名称

(2) 进入 ANSYS 后，可以通过下列方式更改工作名称：

命令操作：

/FILNAME, Fname, Key

菜单操作：

Utility Menu → File → Change Jobname (图 2-4)

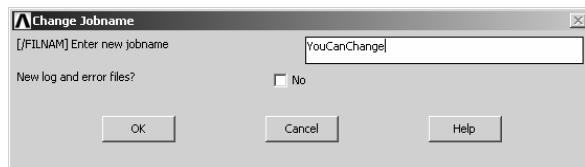


图 2-4 改变工作名称

/FILNAME 命令只在起始层 (Begin Level) 有效。即使在 ANSYS 入口给定了工作名称，用户仍然可以通过此命令改变工作名称。工作名称只适用于用户在 /FILNAME 命令发出前打开的文件，不适用于此前已经打开的文件。如果用户想要在发出 /FILNAME 命令时启动新的文件（如 log 文件 Jobname.LOG 和错误文件 Jobname.ERR），设定 /FILNAME 的 Key 声明为 1。否则，以上已打开文件仍然是初始的工作名称。

2. 定义分析标题

ANSYS 系统将在所有的图形显示和求解输出中包含该标题。

命令操作：

/TITLE

菜单操作：

Utility Menu → File → Change Title (图 2-5)

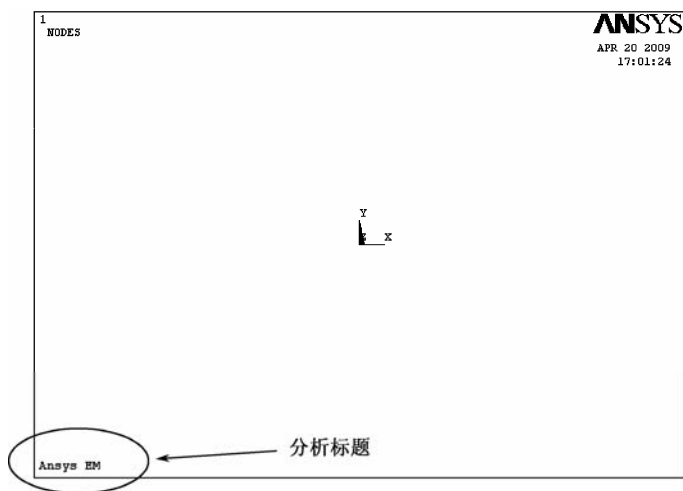


图 2-5 分析标题

2.2.3 定义单位

ANSYS 软件没有为分析指定单位制，除了磁场分析外，只要用户保证输入数据使用同一种单位制，就可使用任意一种单位制。

使用/UNITS 命令，用户可在 ANSYS 数据库中设置标记正在使用的单位制。



/UNITS 命令不能将数据从一种单位制转换到另一种单位制，它仅作为后续分析的一个记录。

2.2.4 定义单元类型

ANSYS 单元库有超过 150 种不同的单元。每个单元都有唯一的编号和指定单元类型的前缀。例如，BEAM4, PLANE77, SOLID96 等。ANSYS 提供的单元类型参见表 2-1。

表 2-1 ANSYS 提供的单元类型

BEAM	MESH
CIRCUit	Multi-Point Constraint
COMBINation	PIPE
CONTACT	PLANE
FLUID	PRETS (Pretension)
HF (High Frequency)	SHELL
HYPERelastic	SOLID
INFINite	SOURCE
INTERface	SURFace

续表

BEAM	MESH
LINK	TARGEt
MASS	TRANSducer
MATRIX	USER

用户必须在通用前处理器 **PREP7** 内定义单元类型，使用 **ET** 命令族（**ET,ETCHG** 等）或对应的 **GUI** 等效命令来实现。

许多单元类型有附加选项，称为 **KEYOPTs**，它们通过 **KEYOPT(1),KEYOPT(2)** 的形式来索引。例如，**BEAM4** 的 **KEYOPT(9)** 使用户可以选择使用计算单元中间的结果。用户可以通过 **ET** 和 **KEYOPT** 命令来设置 **KEYOPTs**（**Main Menu**→**Preprocessor**→**Element Type**→**Add/Edit/Delete**）。

命令操作：

ET, ITYPE, Ename, KOP1, KOP2, KOP3, KOP4, KOP5, KOP6, INOPR

ITYPE：任意单元类型编号。默认为现有最大编号数加 1。

Ename：单元名称或者编号。名称由前缀和唯一的编号组成，如 **BEAM3**。名称的类型前缀可以省略（如 **BEAM**），但是仍然会在输出文件显示。如果 **Ename = 0**，此单元被定义为空单元。

菜单操作：

Main Menu→**Preprocessor**→**Element Type**→**Add/Edit/Delete**（图 2-6）。

首先单击“**Add...**”按钮添加单元（图 2-7），然后选择单元类型和编号（图 2-8），单击“**OK**”按钮确认操作，出现单元类型对话框，单击“**Close**”按钮完成操作（图 2-9）。

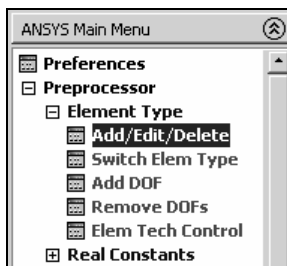


图 2-6 定义单元类型

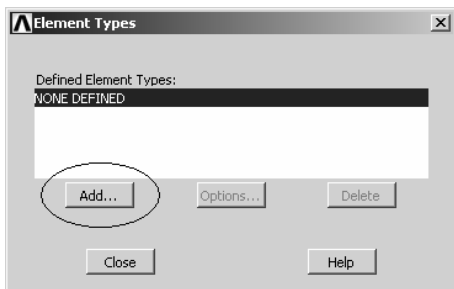


图 2-7 单击“Add...”按钮添加单元

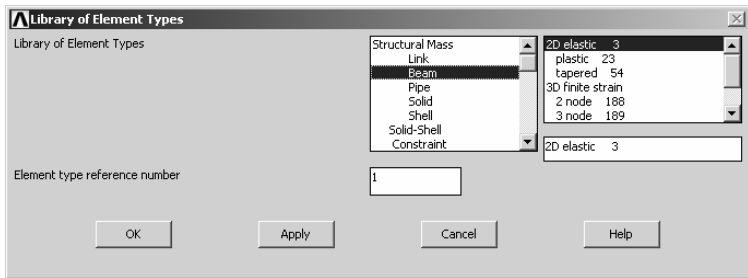


图 2-8 选择单元类型和编号

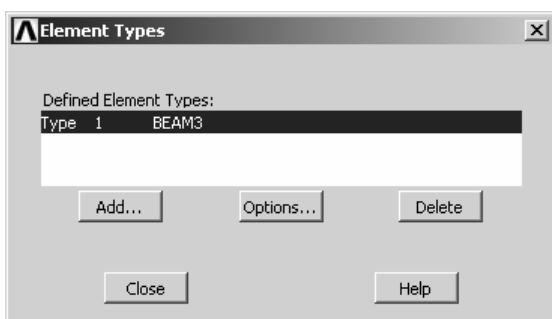


图 2-9 定义的单元 BEAM3

2.2.5 定义实常数

单元的实常数是由单元类型决定的性质，例如，二维梁单元 **BEAM3** 的实常数有面积（**AREA**）、转动惯量（**IZZ**）和高度（**HEIGHT**）等。并不是所有的单元类型都需要实常数，而且同种类型的不同单元可能拥有不同的实常数。

用户可以使用 **R** 命令或者此命令的对应菜单路径来设定实常数。

命令操作：

R, NSET, R1, R2, R3, R4, R5, R6

NSET:

设定编号（由用户任意设定）。如果和之前设定的编号相同，则重置。编号和定义的单元有关。在 **GUI** 下，程序自动设定编号。

R1, R2, R3, ..., R6

实常数值（如面积、转动惯量和厚度等），或者表格输入边界条件时的表格名称。如果输入超过 6 个实常数则使用 **RMORE** 命令。

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Other→Real Constants→Add/Edit/Delete

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circuit→Builder→Mechanical→Mass

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circuit→Builder→Mechanical→Spring→Nonlin Rotary

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circuit→Builder→Mechanical→Spring→Nonlin Trans

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circuit→Builder→Transducer→ElecMech

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circuit→Edit Real Cnst

Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Other→Real Constants→Add/Edit/Delete

可以看出，菜单操作的方法不止一种，用户在使用时可以根据方便使用任意一种，如果使用 **Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete** 路径操作（图 2-10），如果没有定义过任何单元，则单击“Add...”按钮（图 2-11）后会弹出对话框（图 2-12），提醒用户没有定义过任何单元，程序会定义通用的实常数。单击“Close”按钮关闭对话框，进入设定界面（图 2-13）。

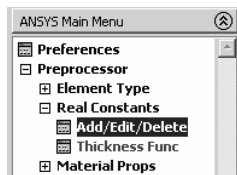


图 2-10 定义实常数



图 2-11 单击“Add...”按钮添加单元

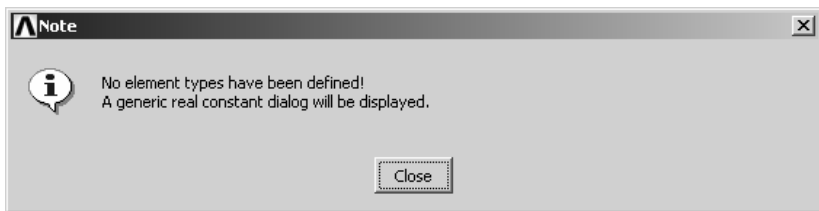


图 2-12 提示没有定义任何单元

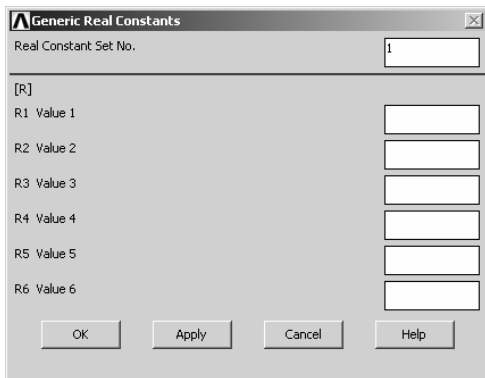


图 2-13 定义通用实常数

如果定义过单元，如 BEAM3，则单击“Add...”按钮（图 2-11）后会出现（图 2-14），单击“OK”按钮确认后出现定义实常数界面（图 2-15）。

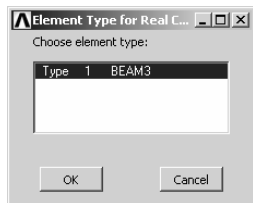


图 2-14 添加单元 BEAM3

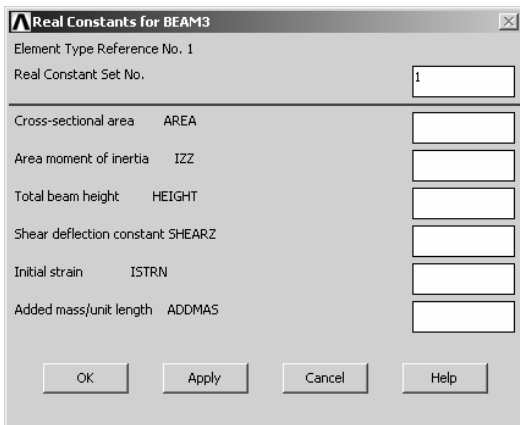


图 2-15 定义 BEAM3 的实常数

2.2.6 定义材料属性

大多数的单元类型要求有材料属性。根据应用的不同，材料属性可能是线性的也可能是非线性的。如同单元类型和实常数，每一组材料属性都有一个材料索引编号。这里主要介绍一下线性材料的材料属性的设定。

线性材料属性可能是常数或者温度相关，也可能各向同性或者正交的。定义常数材料属性，使用命令 **MP**，其菜单路径为 **Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models**。同时，用户也需要指定适当的标签，如指示杨氏模量的 **EX,EY,EZ**，指示热传导率的 **KXX,KYY,KZZ** 等。



对于各向同性材料，用户只需要定义 X 方向的属性即可，Y 和 Z 方向的属性默认为等同于 X 方向的属性。

除了在 Y 和 Z 方向的默认属性以外，其他材料属性也采用一些默认值以减少输入量，如泊松比 (**NUXY**) 默认为 0.3。

命令操作：

MP, Lab, MAT, C0, C1, C2, C3, C4

Lab：有效地材料标签。如电导率 **RSVX**。

MAT：与单元关联的材料编号。

C0：材料特性值，或者如果被定义，它就是多项式的常数项。**C0** 也可能是表格名称 (**%tablename%**)，如果 **C0** 是表格名称，**C1~C4** 全被忽略。

C1, C2, C3, C4：在特性—温度多项式中，分别是线性、平方、立方和四次方项系数。

如果 **C1~C4** 全是有效输入，则特性多项式为

$$\text{特性} = C0 + C1(T) + C2(T)^2 + C3(T)^3 + C4(T)^4$$

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Other→Change
Mat Props→Material Models

Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Other→Change Mat Props→
Material Models

采用 **Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models** 操作 (图 2-16)，出现“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框 (图 2-17)。定义结构线性各向同性材料的杨氏模量 **EX** 和泊松比 **PRXY**，在右边“Material Models Available”可用材料模型栏中 (图 2-18) 选择，双击后定义 **EX** 和 **PRXY** (图 2-19)。

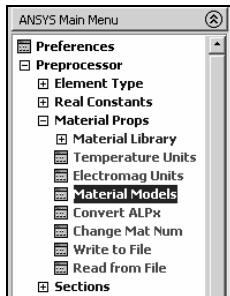


图 2-16 定义材料属性

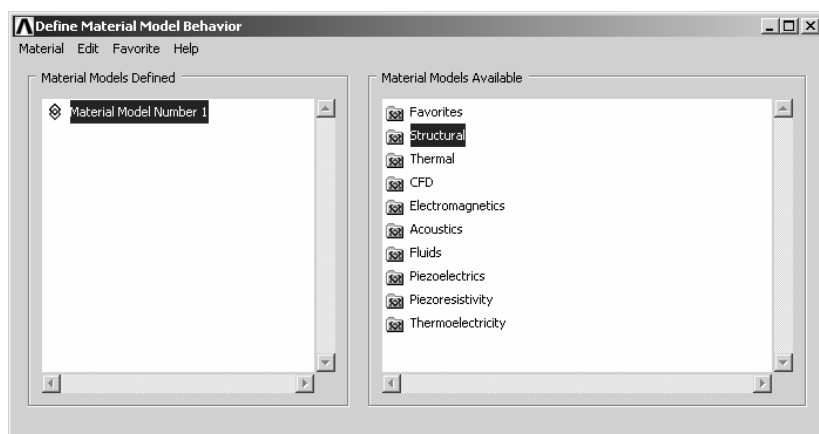


图 2-17 定义材料模型性质

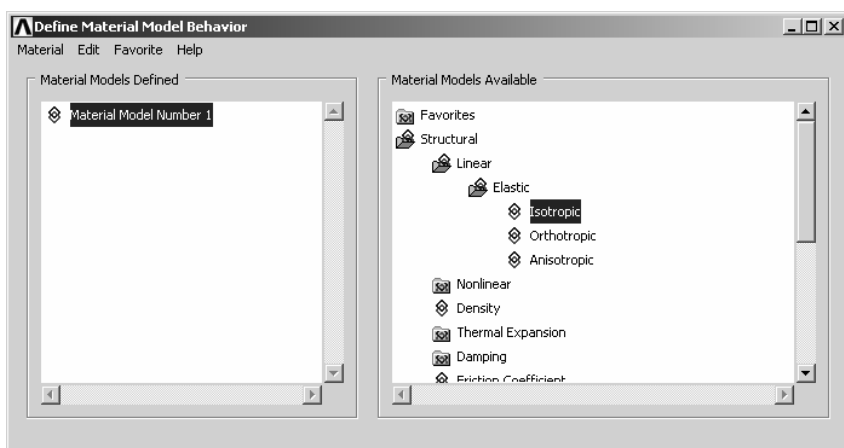


图 2-18 定义结构线性各向同性材料的 EX 和 PRXY

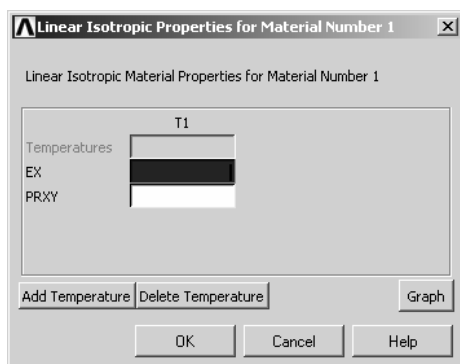
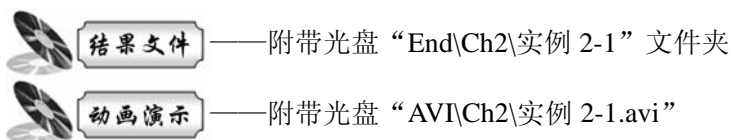


图 2-19 定义 EX 和 PRXY

实例 2-1 定义单元类型，材料属性

定义工作名称为 TEST，分析标题为 Structure，单元为 Plane42，材料属性：弹性模量 6E11，泊松比 0.3，密度 9。



由 ANSYS Product Launcher 进入 ANSYS，则在 Job Name 输入栏中输入 “TEST”，单击 “Run” 按钮进入 ANSYS（图 2-20）。



图 2-20 由 ANSYS Product Launcher 进入 ANSYS

1. GUI 操作

(1) 设定工作名称

如果没有经过 ANSYS Product Launcher 直接打开 ANSYS，则首先设定工作名称，选择路径 Utility Menu→File→Change Jobname（图 2-21），然后在输入框中输入 “TEST”（图 2-22）。由 ANSYS Product Launcher 进入的用户不必进行此操作。

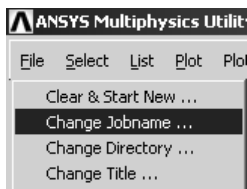


图 2-21 改变工作名称

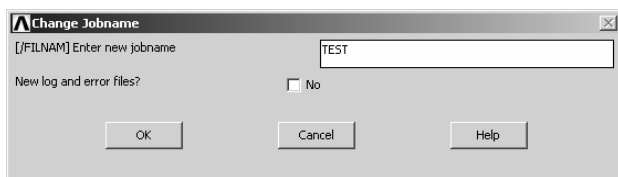


图 2-22 输入工作名称 TEST

(2) 设定分析标题

设定好工作名称后，开始设定分析标题（图 2-23），输入框中输入 “Structure”，单击 “OK” 按钮确认（图 2-24）。

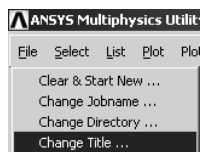


图 2-23 设定分析标题

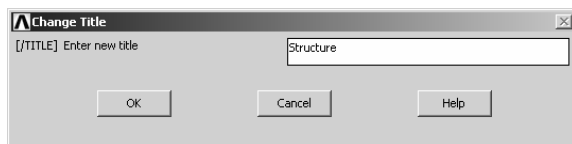


图 2-24 输入框中输入 “Structure”

(3) 定义单元类型

定义单元 Plane42。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit /Delete (图 2-25), 单击“Add/Edit/Delete”, 出现“Element Types”单元类型对话框 (图 2-26), 单击“Add...”按钮添加单元。

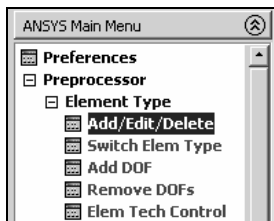


图 2-25 定义单元

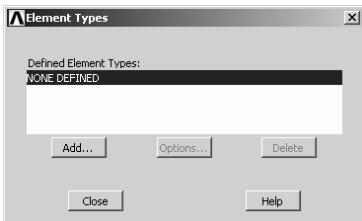


图 2-26 “Element Types”单元类型对话框

之后出现“Library of Element Types”单元类型库对话框, 在左侧选择栏中选择“Solid”, 右侧选择栏中选择“Quad 4node 42”, 即 PLANE42 单元。用户在此处并没有看到“PLANE”, 也许不太确定就是 PLANE42 单元。但是前面已经指出, 单元名称由前缀和唯一的编号组成, 名称的类型前缀可以省略, 所以, 看到编号 42 用户可以放心地确认此即为 PLANE42 单元。单击“OK”按钮, 完成定义, 如图 2-28 所示, 单击“Close”按钮完成单元定义。

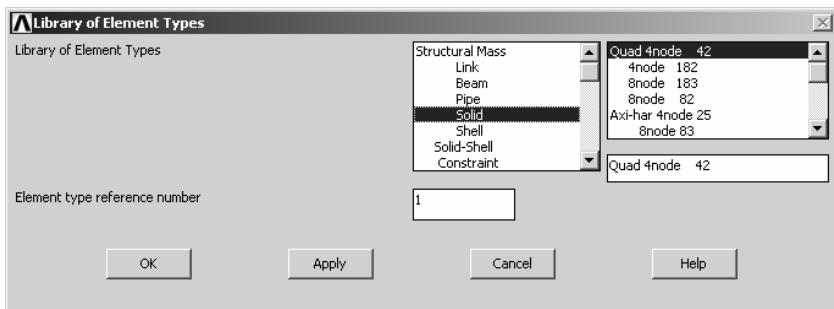


图 2-27 单元类型库

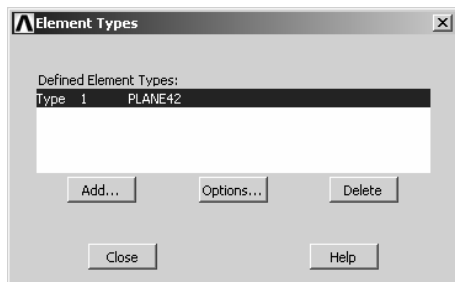


图 2-28 单元类型 PLANE42

(4) 定义材料属性

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models (图 2-29), 单击后打开“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框。

首先定义材料的杨氏模量 EX 和泊松比 PRXY。右边“Material Models Available”栏中选择 Structure→Linear→Elastic→Isotropic（图 2-30），双击后在 EX 栏中输入“6E11”，PRXY 栏中输入“0.3”（图 2-31）。单击“OK”按钮确认操作。

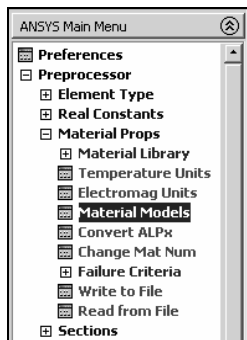


图 2-29 定义材料属性

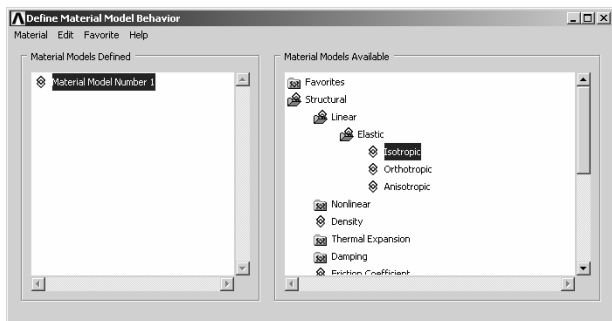


图 2-30 定义结构线性各向同性材料的 EX 和 PRXY

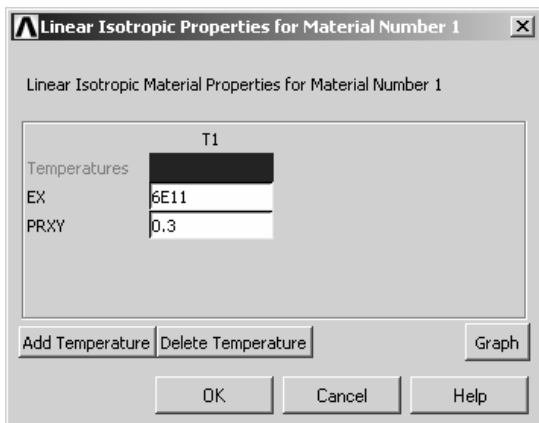


图 2-31 设定 EX 和 PRXY 值

然后定义密度。右边“Material Models Available”栏中选择 Structure→Density（图 2-32），双击打开设定框，密度值输入“9”（图 2-33）。单击“OK”按钮确认。

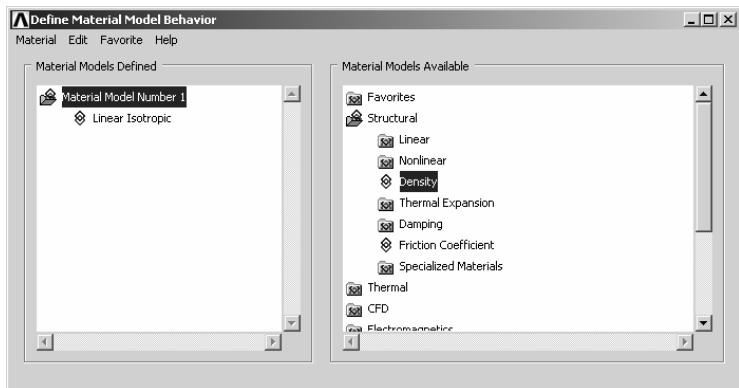


图 2-32 定义材料密度

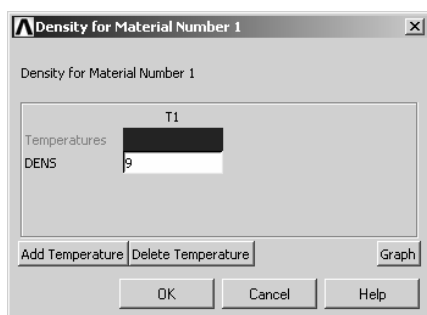


图 2-33 设定密度为 9

参数设定好之后，在“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框左边栏可以看到设定的参数列表（图 2-34）。

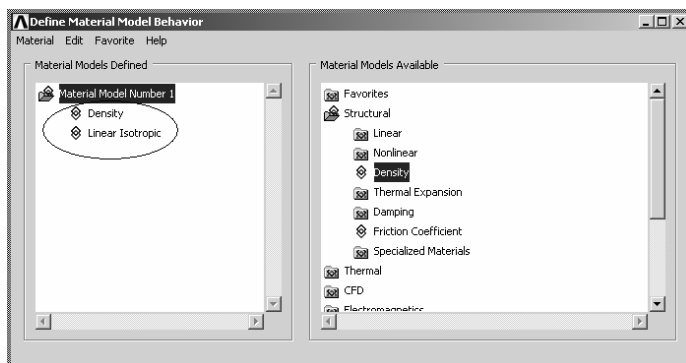


图 2-34 左边栏可以看到设定的参数列表

确认所有操作正确后，单击“SAVE-DB”按钮保存操作（图 2-35）。

2. 命令流操作

/FILNAME, TEST	! 设定工作名称为 TEST
/PREP7	! 进入一般前处理器
/TITLE, STRUCTURE	! 设定分析名称为 Structure
ET, 1, PLANE42	! 定义编号为 1 的单元类型为 PLANE42
MP, EX, 1, 6E11	! 定义杨氏模量，泊松比和密度
MP, PRXY, 0.3	
MP,DENS, 1, 9	
SAVE	! 保存

命令流操作说明：

(1) 以上命令可以通过命令输入窗口逐行输入（图 2-36）。

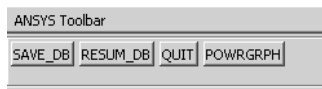


图 2-35 保存操作



图 2-36 通过命令窗口输入

或者为了简便,可以采用批处理方法,先将以上命令流输入到一个 txt 文件中,然后选择 File→Read Input from...导入 ANSYS (图 2-37)。选择建立的文件,如 TEST.txt,单击“OK”按钮导入(图 2-38)。

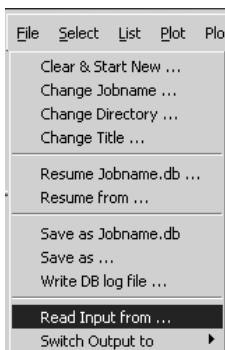


图 2-37 选择 Read Input from...导入文件

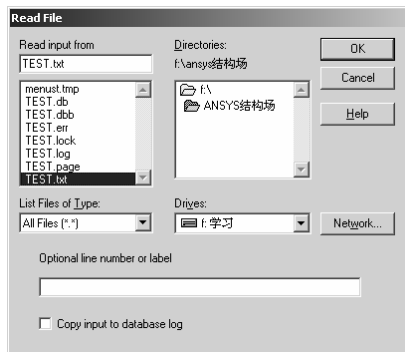


图 2-38 导入 TEST.txt 文件

还可以通过“Session Editor”输入以上命令,单击“OK”按钮确认操作(图 2-39)。

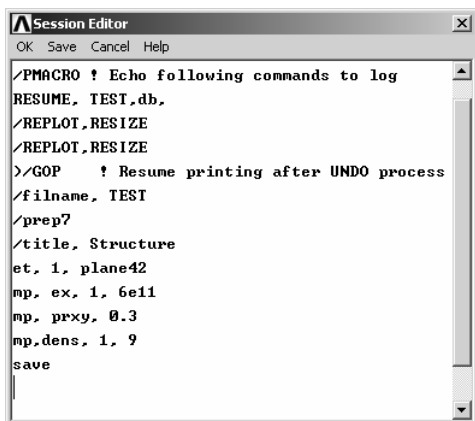


图 2-39 通过“Session Editor”输入

(2) 叹号“!”是嵌入命令行中的一种注释方法,其内容不出现在输出文档中。

2.2.7 建立有限元模型——直接建模

定义完材料属性后,下一步就该创建有限元模型了。ANSYS 有限元建模的方法有两种:实体建模(Solid Modeling)和直接建模(Direct Generation)。这里先介绍直接建模方法。

1. 建立节点

命令操作:

```
N, NODE, X, Y, Z, THXY, THYZ, THZX
```

NODE: 设定的节点编号。之前定义的同样编号的节点将被重新定义。默认节点号为最大节点编号加 1。

X,Y,Z: 当前坐标系下的节点位置。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→On Working Plane

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS

如果使用第一个路径(图 2-40),单击出现“Creat Nodes on WP”在工作平面上建立节点对话框(图 2-41)。在图形显示窗口单击或者输入栏中输入坐标都可以建立节点。

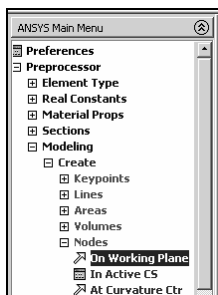


图 2-40 建立节点

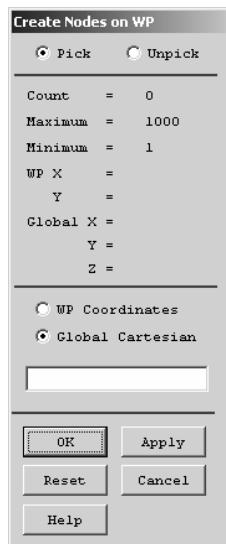


图 2-41 在工作平面上建立节点对话框

如果使用第二个路径,单击出现如图 2-42 所示对话框,输入数据后单击“OK”按钮确认操作。

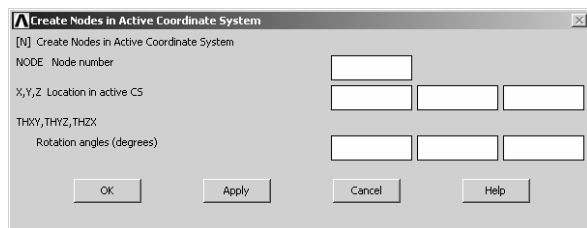


图 2-42 在当前坐标系建立节点对话框

2. 显示节点和列出节点

显示节点可以采用“NPLOT”命令,列出节点采用“NLIST”命令。

显示节点是构建模型中一项十分重要的功能,它可以检查建立的对象正确与否,如位置、标号等。

命令操作:

NPLOT, KNUM

KNUM: 节点号关键字。

0: 不显示节点号。

1: 显示节点号。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move / Modify→RotateNode→To Surf Norm→On Areas

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move / Modify→RotateNode→To Surf Norm→On Lines

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move / Modify→RotateNode→To Surf Norm→with Area

Utility Menu→Plot→Nodes (图 2-43)

但是以上 GUI 方法只能显示节点, 不能显示节点编号。为了显示节点编号, 需要采用 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering (图 2-44), 然后在“Plot Numbering Controls”绘图编号控制对话框中选择“node numbers”为“On”(图 2-45)。

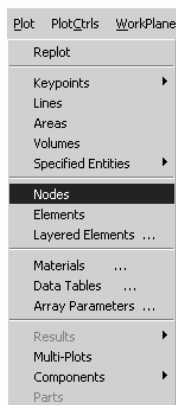


图 2-43 显示节点

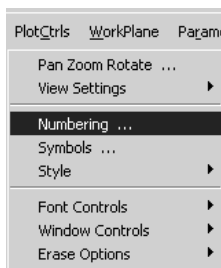


图 2-44 显示编号

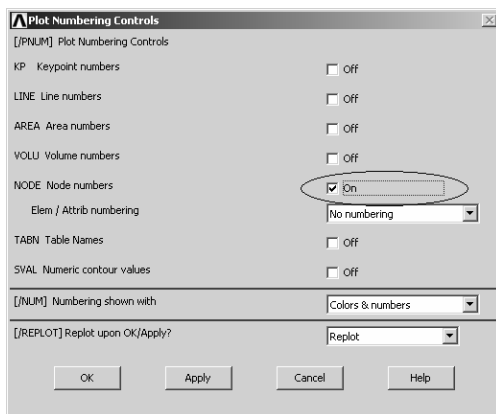


图 2-45 显示节点编号



“Plot Numbering Controls”绘图编号控制对话框不仅可以设定是否显示节点编号, 还可设定是否显示面积、单元等编号。

列出节点会在一个新的窗口中显示出用户所定义的节点的信息, 如节点坐标等, 也是一个重要的功能。

命令操作:

NLIST, NODE1, NODE2, NINC, Lcoord, SORT1, SORT2, SORT3

NODE1, NODE2, NINC: 列出从 NODE1 到 NODE2 (默认为 NODE1) 的所有节点。

以 NINC 为步长 (默认为 1)。如果 NODE1=ALL (默认), NODE2 和 NINC 都忽略, 列出所有节点。

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→List Results→Sorted Listing→Sort Nodes

Utility Menu→List→Nodes (图 2-46)

3. 定义单元

当用户定义完成节点并且检查无误后, 必须使用适当单元, 将节点连接建立单元, 形成有限元模型。单元有一维、二维、三维之分。定义单元采用连接已定义节点的方式。对于二维和三维模型, 采用逆时针或者顺时针都可以。当单元建立后, 该单元的属性由前面定义的单元类型、实常数和材料属性来决定。



单元定义前一定要定义单元类型、实常数和材料属性。

命令操作:

E, I, J, K, L, M, N, O, P

I: 第一个节点的编号。

J, K, L, M, N, O, P: 第二个到第八个节点编号。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes (图 2-47)

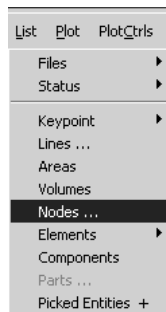


图 2-46 列出节点

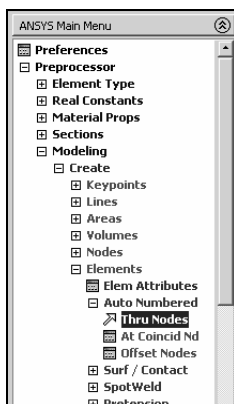


图 2-47 通过节点建立单元

单击“Thru Nodes”按钮, 弹出“Elements from Nodes”由节点建立单元对话框(图 2-48), 通过输入节点坐标和在图形界面上拾取节点都可以建立单元。

4. 显示单元和列出单元

显示单元功能将单元显示在图形窗口中，供用户查看。

命令操作：

EPlot

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→CMS→CMS Superelements→By Picking

Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Create Remesh Zone(s)→Select Rezone Component

Main Menu→Solution→Time Controls→Time Step Prediction

Utility Menu→Plot→Elements（图 2-49）

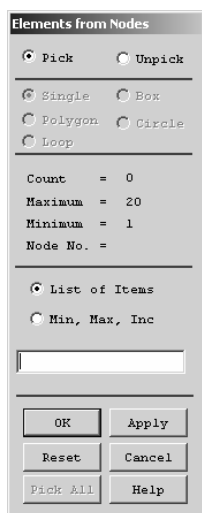


图 2-48 “Elements from Nodes”对话框

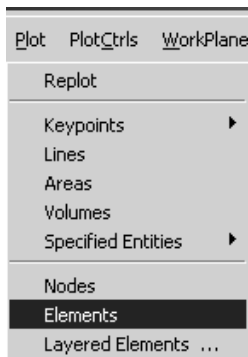


图 2-49 绘制单元

列出单元功能列出所有单元，用户可以检查单元属性是否正确。

命令操作：

ELIST, IEL1, IEL2, INC, NNKEY, RKEY, PTKEY

IEL1, IEL2, INC: 类似 NLIST 中的 NODE1, NODE2, NINC。

菜单操作（图 2-50）：

Utility Menu→List→Elements→Attributes + RealConst

Utility Menu→List→Elements→Attributes Only

Utility Menu→List→Elements→Nodes + Attributes

Utility Menu→List→Elements→Nodes + Attributes + RealConst

实例 2-2 两端固定杆件建模

本例条件同实例 1-1，但是这里给出采用 ANSYS 直接建模方法来建模。



结果文件

——附带光盘“End\Ch2\实例 2-2”文件夹



动画演示

——附带光盘“AVI\Ch2\实例 2-2.avi”

两端固定杆受到轴向作用力 F_1 , F_2 , 求固定端反作用力 R_1 , R_2 。图 2-51(a)为所探讨的工程系统模型, 图 2-51(b)为对应的有限元模型, 此模型中有四个节点, 三个杆件元素。

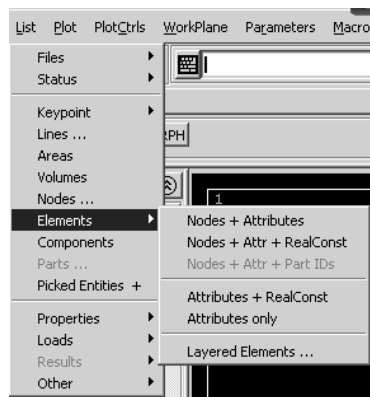


图 2-50 列出单元

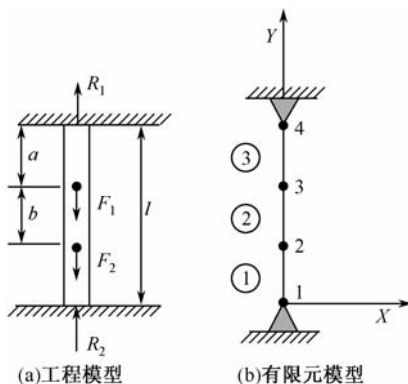


图 2-51 两端固定杆件受力分析

其中, $l = 10\text{m}$, $a = b = 0.3l$, $E = 30 \times 10^6 \text{Pa}$, $F_1 = 2F_2 = 1000 \text{N}$ 。

5. GUI 操作

(1) 定义工作名称和分析名称

定义工作名称为“1D Modeling”。选择路 Utility Menu→File→Change Jobname (图 2-52), 然后在输入框中输入“1D Modeling”(图 2-53)。

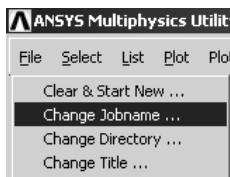


图 2-52 定义工作名称

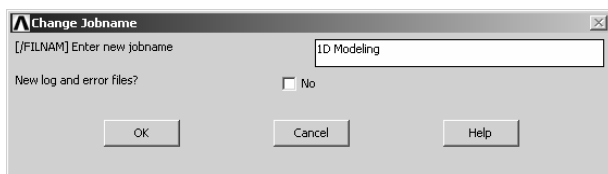


图 2-53 工作名称为 1D Modeling

定义分析名称为“STATICALLY INDETERMINATE REACTION FORCE ANALYSIS”(图 2-54)。输入框中输入“STATICALLY INDETERMINATE REACTION FORCE ANALYSIS”, 单击“OK”按钮确认(图 2-55)。

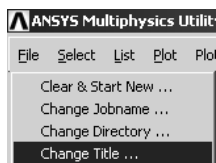


图 2-54 设定分析标题

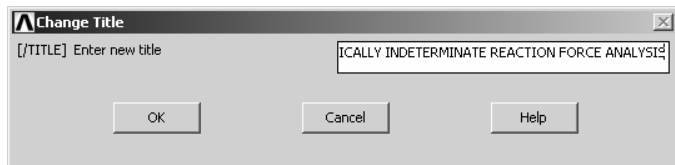


图 2-55 设定标题为 STATICALLY INDETERMINATE REACTION FORCE ANALYSIS

(2) 定义单元类型

定义单元 LINK1。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete (图 2-56)。单击“Add/Edit/Delete”, 出现“Element Types”单元类型对话框(图 2-57)单击“Add...”按钮添加单元。

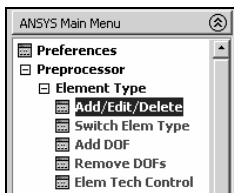


图 2-56 定义单元

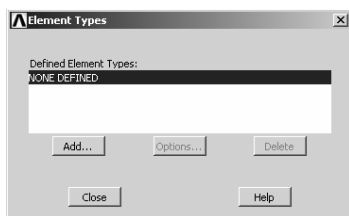


图 2-57 “Element Types” 单元类型对话框

左侧栏中选择“Link”，右侧栏中选择“2D spar 1”（图 2-58）。

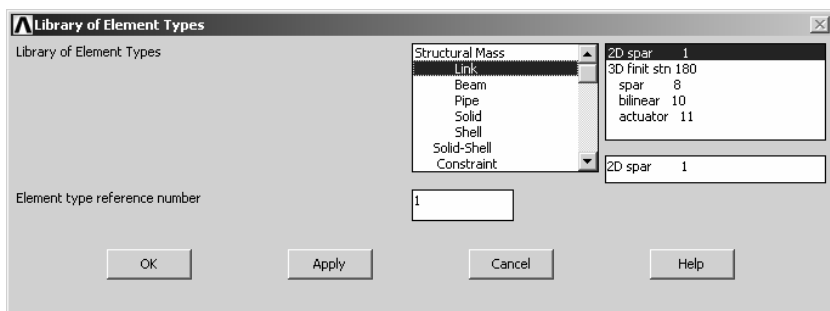


图 2-58 定义 LINK1

单击“OK”按钮确认后，出现如图 2-59 所示，单击“Close”按钮关闭，结束操作。

(3) 定义材料属性

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models（图 2-60），单击后打开“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框。

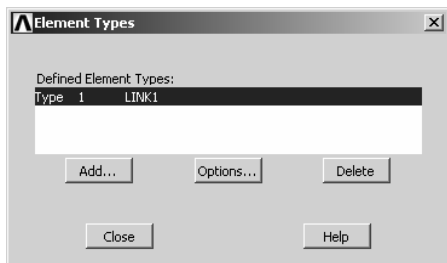


图 2-59 已定义 LINK1

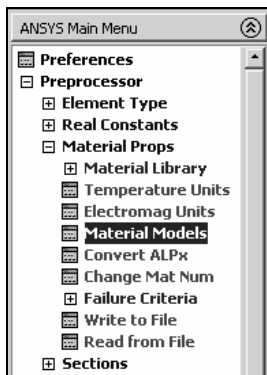


图 2-60 定义材料属性

右边“Material Models Available”栏中选择路径 Structure→Linear→Elastic→Isotropic（图 2-61），双击后在 EX 栏中输入“30E6”，单击“OK”按钮确认操作（图 2-62）。

(4) 定义实常数

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete（图 2-63），单击“Add...”按钮（图 2-64）添加 LINK1（图 2-65）。

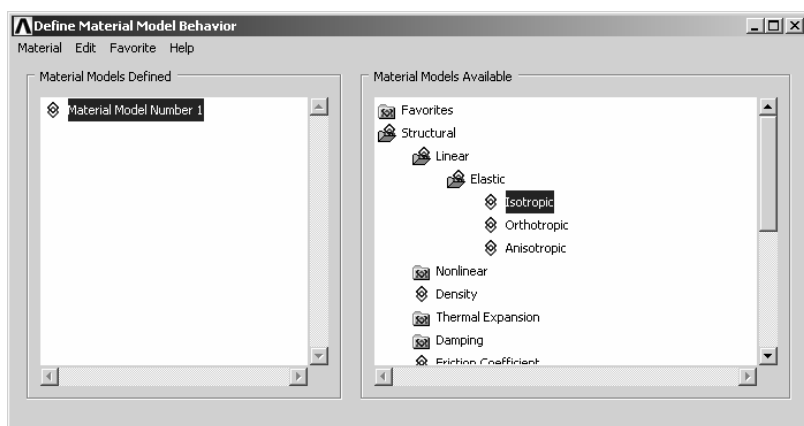


图 2-61 定义结构线性各向同性材料的 EX

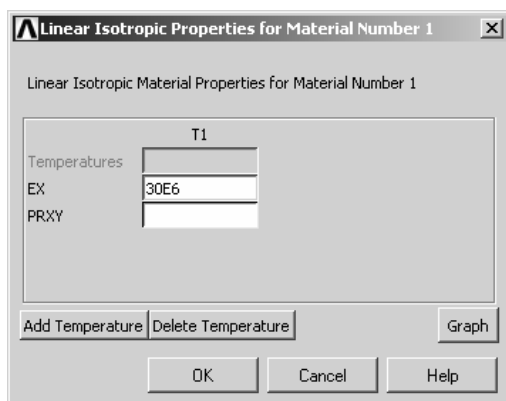


图 2-62 杨氏模量为 30E6

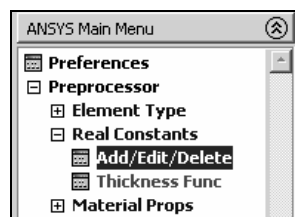


图 2-63 定义实常数

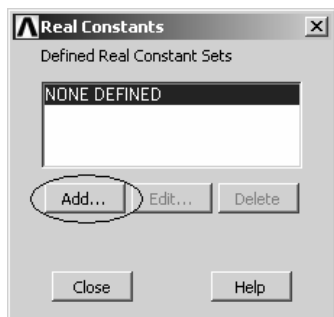


图 2-64 单击“Add...”按钮添加单元

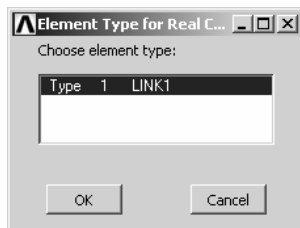


图 2-65 添加 LINK1

单击“OK”按钮确认，在“AREA”横截面积后的输入栏中输入“1”（图 2-66）。

(5) 建立节点

其中节点 1 坐标为 (0,0,0)，节点 2 坐标为 (0,4,0)，节点 3 坐标为 (0,7,0)，节点 4 坐标为 (0,10,0)。

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS（图 2-67）。

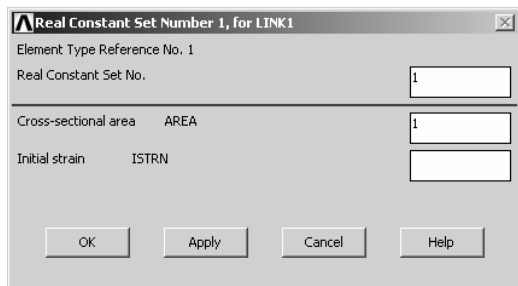


图 2-66 设定横截面积

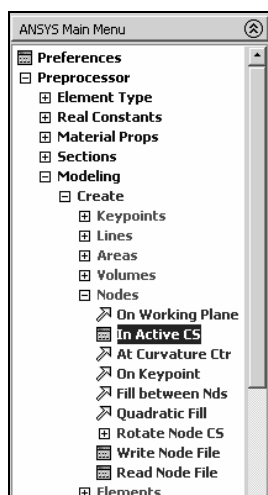


图 2-67 当前坐标系建立节点

单击后出现定义节点对话框，其中分别定义节点 1~节点 4（图 2-68~图 2-71）。

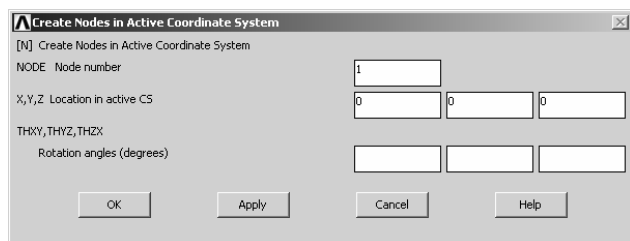


图 2-68 定义节点 1

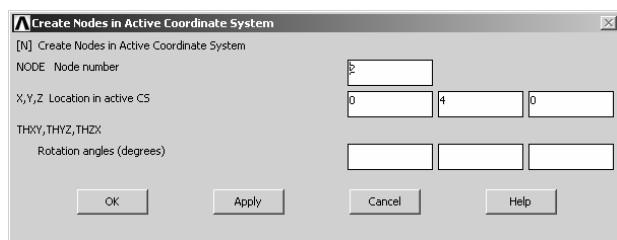


图 2-69 定义节点 2

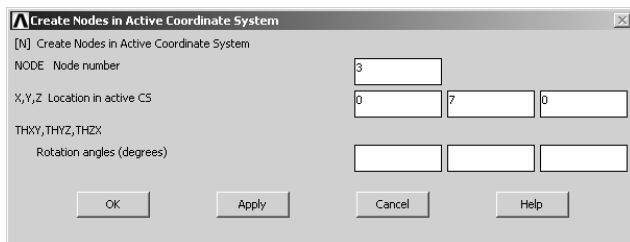


图 2-70 定义节点 3

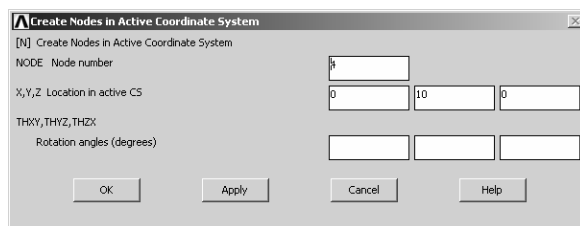


图 2-71 定义节点 4

(6) 建立单元

选择路径：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes (图 2-72)。

单击“Thru Nodes”后，弹出“Elements from Nodes”由节点建立单元对话框(图 2-73)。通过在图形界面拾取节点建立单元(图 2-74~图 2-76)。

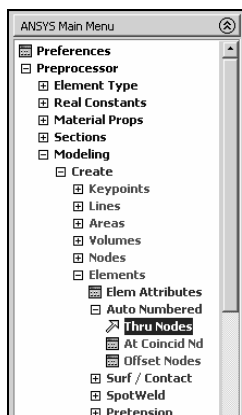


图 2-72 通过节点建立单元

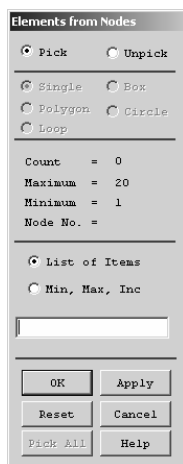


图 2-73 “Elements from Nodes”对话框

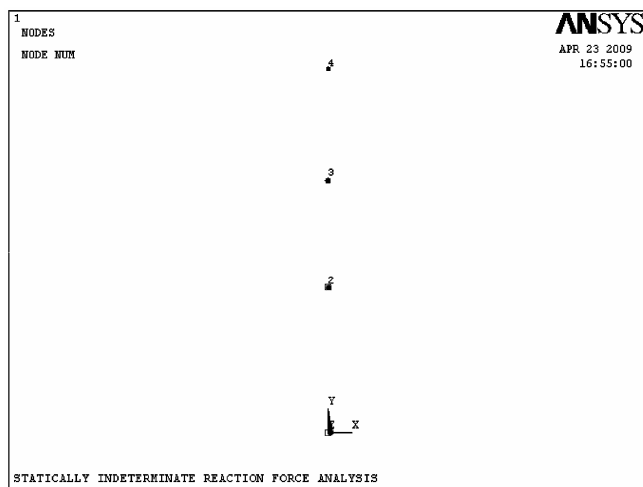


图 2-74 四个已定义节点

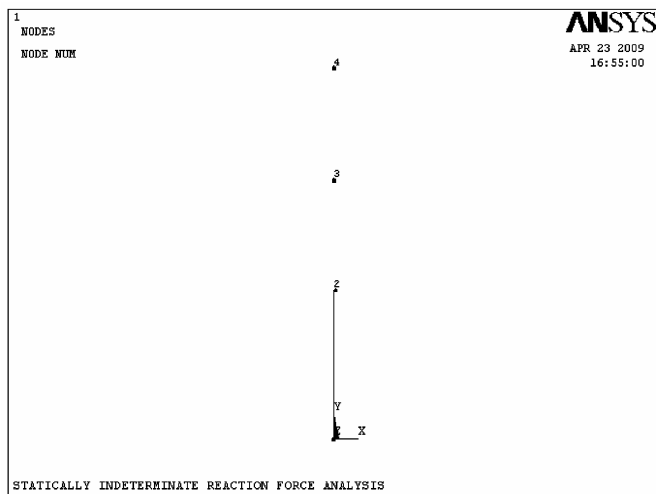


图 2-75 通过拾取操作连接节点 1 和节点 2

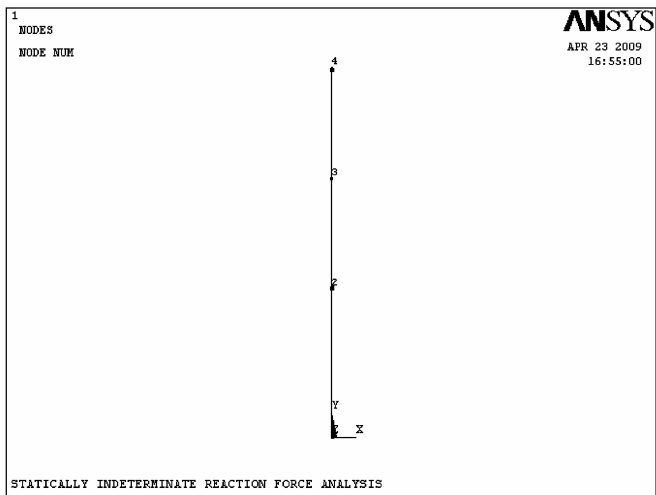


图 2-76 通过拾取操作连接所有节点

(7) 显示，列出节点

显示节点 Utility Menu→Plot→Nodes (图 2-77)。

显示节点编号 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering (图 2-78)，然后在“Plot Numbering Controls”绘图编号控制对话框中选择“Node numbers”为“On”(图 2-79)。

列出节点 Utility Menu→List→Nodes (图 2-80)，弹出“Sort NODE Listing”节点排序对话框，保持默认设置，单击“OK”按钮确认(图 2-81)，弹出节点列表(图 2-82)。

(8) 显示，列出单元

显示单元 Utility Menu→Plot→Elements (图 2-83)，效果图同图 2-76。为了同时显示单元编号，选择路径 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering，弹出“Plot Numbering Controls”绘图编号控制对话框，在“Elem/Attrib numbering”后的下拉菜单中选择“Element numbers”(图 2-84)。各个单元以不同颜色标记(图 2-85)。

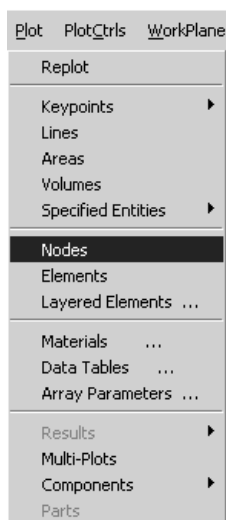


图 2-77 显示节点

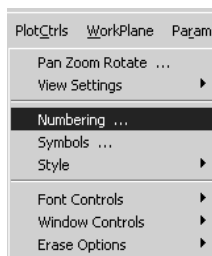


图 2-78 显示编号

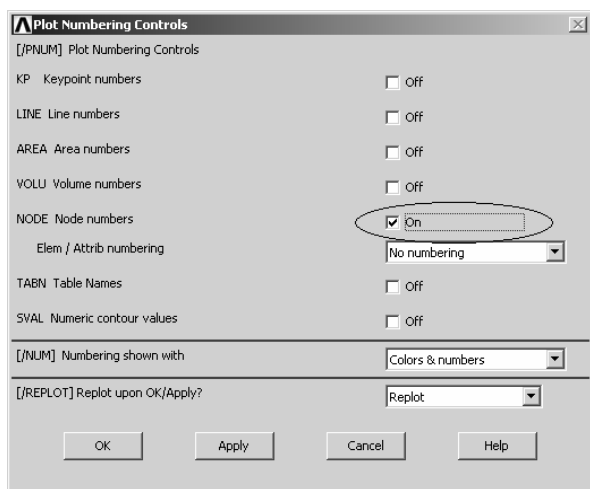


图 2-79 显示节点编号

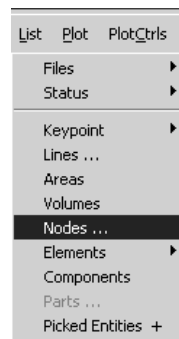


图 2-80 列出节点

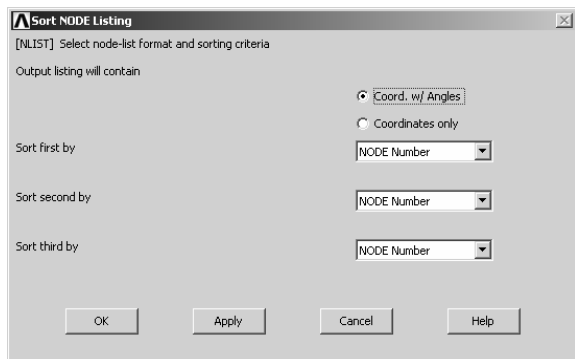


图 2-81 “Sort NODE Listing” 节点排序对话框

LIST ALL SELECTED NODES. DSYS = 0							
SORT TABLE ON NODE NODE NODE							
NODE	X	Y	Z	INXY	INYZ	INZX	
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	
2	0.0000	-1.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	
3	0.0000	7.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	
4	0.0000	10.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00	

图 2-82 节点列表

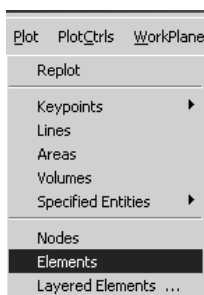


图 2-83 绘制单元

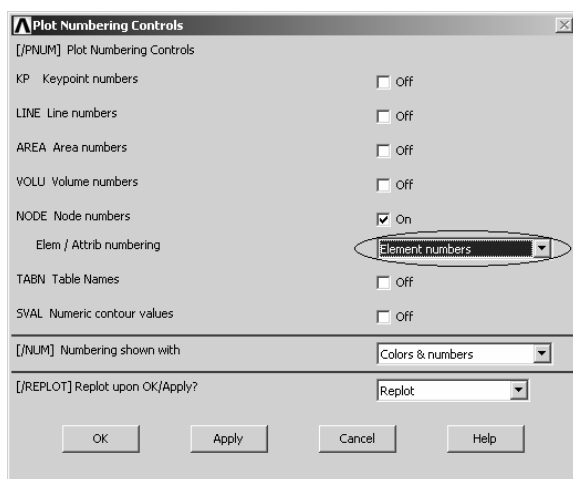


图 2-84 单元编号

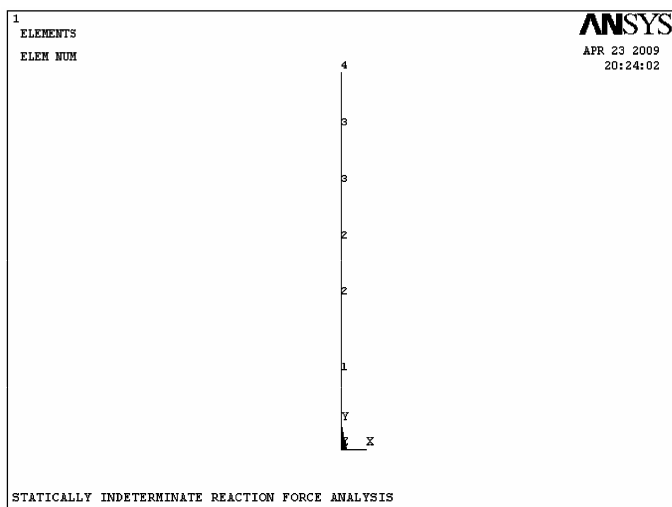


图 2-85 单元编号

列出单元。选择路径 Utility Menu→List→Elements→Attributes + RealConst (图 2-86)。

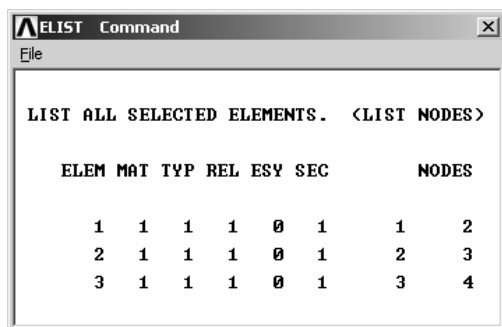


图 2-86 列出单元

6. 命令流操作

```

/FILNAME, 1D Modeling      ! 定义工作名称和分析标题
/TITLE, STATICALLY INDETERMINATE REACTION FORCE ANALYSIS
/PREP7                      ! 进入一般前处理器
ET,1,LINK1                 ! 定义单元 1 为 LINK1 类型
R,1,1                      ! 横截面积(任意设定) = 1
MP,EX,1,30E6               ! 杨氏模量 = 30E6
N,1                        ! 定义节点
N,2,,4
N,3,,7
N,4,,10
E,1,2                      ! 定义单元
E,2,3
E,3,4
NPLOT,0                    ! 显示节点，但是不显示节点编号
NPLOT,1                    ! 显示节点，而且不显示节点编号
NLIST                      ! 列出节点
EPLOT                      ! 显示单元
ELIST                      ! 列出单元
FINISH

```

命令流操作说明：

(1) 实常数具体是什么，要到 ANSYS 的 HELP 文件中查看具体的单元。例如，本例中，采用 LINK1 单元，查看 HELP 知道：

Real Constants:
 AREA - Cross-sectional area (横截面积)
 ISTRN - Initial strain (初始应力)

所以，R1 代表 AREA，本例中的 R,1,1 就是横截面积 = 1

(2) 命令中的默认项。默认项可以不填，系统自动将其默认为默认值，但是如果其后仍有其他输入，需要以逗号分隔为其留出位置，例如：

N,1，其后没有其他输入，系统默认节点 1 的坐标为 (0,0,0)

N,2,4，因为节点 2 的坐标是 (0,4,0)，需要用逗号分隔开留出默认项的位置，所以，2 和 4 之间有两个逗号。

2.2.8 建立有限元模型——实体建模

实体建模是 ANSYS 中的主要建模方式，在这里只做简单介绍。

1. 建立关键点 (Keypoint)

采用实体建模时，关键点与关键点之间可以连接成为线段、面积和体积。

命令操作:

K, NPT, X, Y, Z

NPT: 关键点的索引编号。如果为零, 则可赋予最小编号。

X,Y,Z: 关键点在当前坐标系下的坐标。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→On Working Plane



关键点是针对几何元素, 而节点是针对有限元的元素。在有限元中, 几何模型在网格划分转化为有限元模型时, 会自动或手动建立节点。有限元法求解时, 读入节点的数据, 与关键点无关。

2. 建立线段 (Line)

实体建模时, 线段是面积和体积的边界, 可以由点与点连接而成。

命令操作:

L, P1, P2, NDIV, SPACE, XV1, YV1, ZV1, XV2, YV2, ZV2

P1: 线段开头节点。

P2: 线段结尾节点。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord (图 2-87)

3. 建立面积

实体建模时, 面积可以由点连接而成, 也可以由线段围成。当以点的方式建立面积时, 点必须以顺时针或者逆时针的顺序输入 (图 2-88)。当以线段为边界建立面积时, 线段的顺序无关, 但是必须是一个封闭的边界 (图 2-89)。

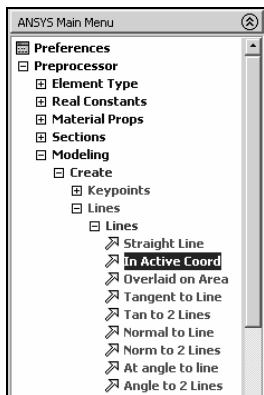


图 2-87 当前坐标系建立线段

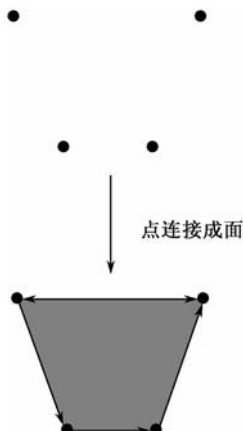


图 2-88 点连接成面

(1) 点连接成面

命令操作:

A, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18

P1, P2, P3, ..., P18: 定义面积的关键点, 最多输入 18 个, 至少需要输入 3 个。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs (图 2-90)

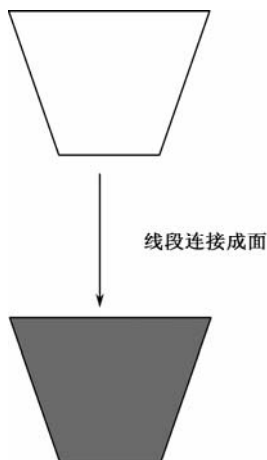


图 2-89 线段连接成面

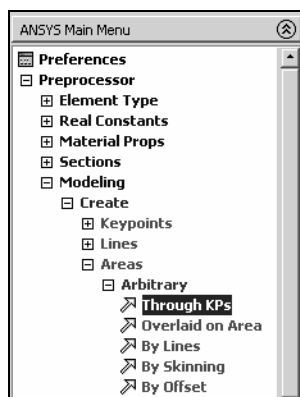


图 2-90 由关键点建立面积

(2) 线段连接成面

命令操作:

AL, L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10

L1, L2, L3, ..., L10: 定义面积的线段。最少需要三个节点。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→By Lines (图 2-91)

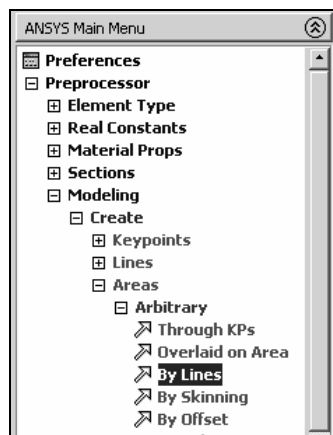


图 2-91 由线段建立面积

2.3 划分网格

在划分网格前，甚至在建立模型前，决定究竟是用自由网格（Free Mesh）还是用映射网格（Mapped Mesh）十分重要。自由网格对单元的形状无限制（图 2-92）。映射网格对单元形状和网格类型有限制（图 2-93）。

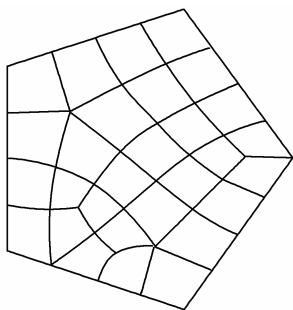


图 2-92 自由网格

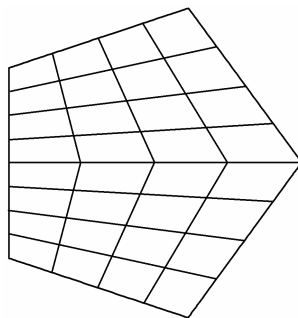


图 2-93 映射网格

2.3.1 网格控制

ANSYS 使用的默认网格控制可能对于用户的设计已经足够，如果这样，用户不必再设定任何网格控制。但是，如果要使用网格控制，用户必须在网格化实体模型前设定。

网格控制可以设定单元形状、中间节点位置和网格化实体模型的单元大小。这一步是有限元分析最重要的步骤之一，因为，这一步的精确与否深刻影响到整个分析的正确性和经济性。这一步最主要的就是定义单元的大小和数目。网格太细也许会有比较好的精确性，但是因为网格太密太细，会占用大量的系统资源和分析时间，而精确性没有显著提高，所以，网格并非越密越好，要根据实际情况来设定参数。

1. 网格形状

首先，用户需要设定网格形状。例如，面单元既可以网格化为四边形，也可以网格化为三角形。

命令操作：

MSHAPE, KEY, Dimension

KEY：设定单元形状。

0：对于二维单元，使用四边形划分网格。对于三维单元，使用六面体划分单元。

1：对于二维单元，使用三角形划分网格。对于三维单元，使用四面体划分单元。

Dimension：设定被划分网格的维度。

2D：二维。

3D：三维。

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Mapped→4 to 6 sided

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesher Opts

Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Create Remesh Zone(s)→Mesh Controls→Global Meshing Options

选择第二个路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesher Opts（图 2-94），单击出现定义网格属性对话框（图 2-95）。

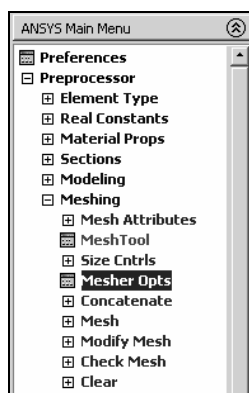


图 2-94 网格选项

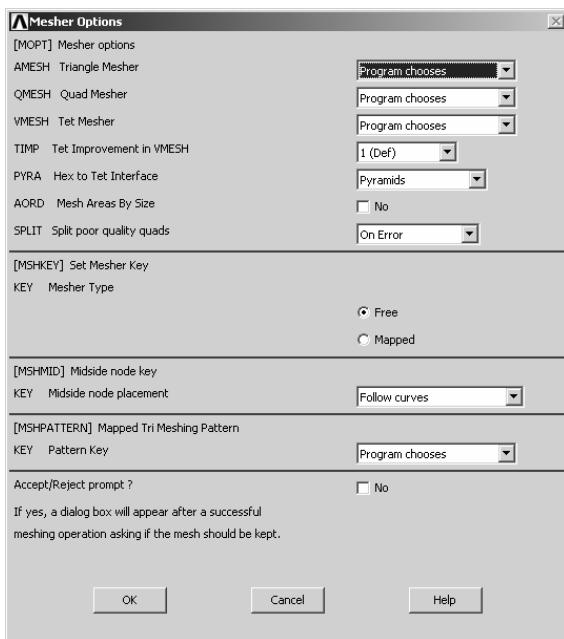


图 2-95 网格属性对话框

2. 自由网格和映射网格

设定好网格形状后，下一步就是设定使用自由网格还是映射网格。

命令操作：

MSHKEY, KEY

KEY: 设定使用的网格化类型。

0: 自由网格（默认）。

1: 映射网格。

2: 可能的话，使用映射网格，否则，使用自由网格。

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesher Opts

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool（图 2-96），单击出现网格化工具箱（图 2-96）。表 2-2 列出支持的单元形状和类型组合。

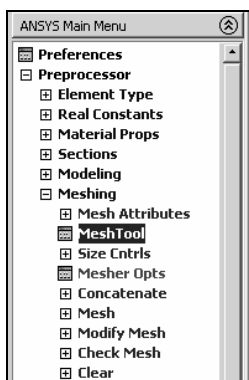


图 2-96 选择网格化工具

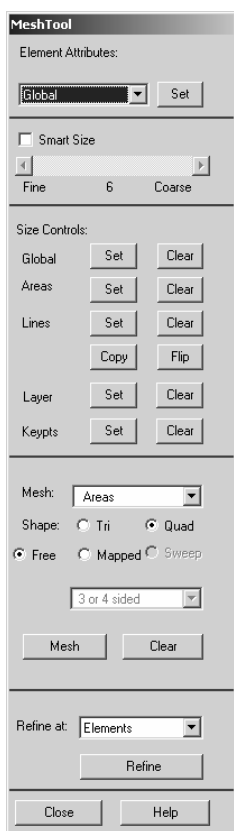


图 2-97 网格化工具箱

表 2-2 支持的单元形状和类型组合

单元形状	自由网格	映射网格	可能的话映射网格, 否则自由网格且智能大小控制开启
Quadrilateral	Yes	Yes	Yes
Triangle	Yes	Yes	Yes
Hexahedral	No	Yes	No

3. 自由网格的智能单元大小控制

在一些情况下, 网格形状控制 MSHAPE 或其对应菜单操作 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→meshing option 足够划分出合适单元, 其单元大小由默认单元大小属性决定 (图 2-98)。单元大小不符合要求, 则需要更改单元大小。

智能单元大小控制 (Smart Element Sizing, SmartSizing) 是一项设定初始单元大小的功能。SmartSizing 使用户在自动网格化过程中有更多可能划分出合适形状的单元。

命令操作:

SMRTSIZE, SIZLVL, FAC, EXPND, TRANS, ANGL, ANGH, GRATIO, SMHLC, SMANC, MXITR, SPRX

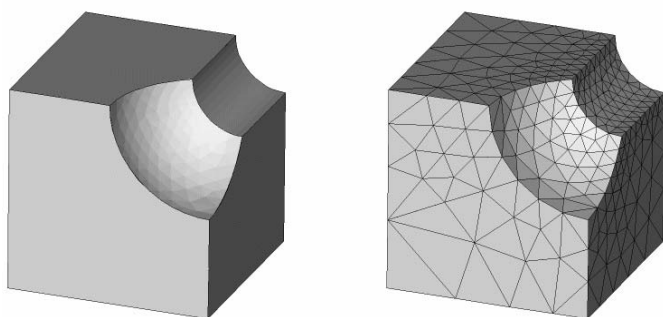


图 2-98 默认单元大小

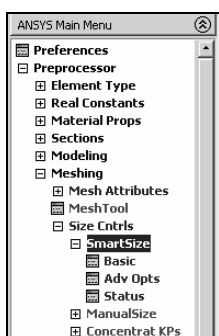


图 2-99 SmartSize

SIZLVL: 整体单元大小。有效输入如下所述。

n : 激活 SmartSizing, 设定大小级别为 n , 必须是从 1 (细网格) ~10 (粗网格) 的整数。

STAT: 列出当前 SMRTSIZE 设置。

DEFA: 设定所有 SMRTSIZE 设置为默认值。

OFF: 关闭 SmartSizing。

菜单操作 (图 2-99):

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→SmartSize→Adv Opts

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→SmartSize→Basic

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→SmartSize→Status

不同级别的网格划分如图 2-100, 图 2-101 和图 2-102 所示。

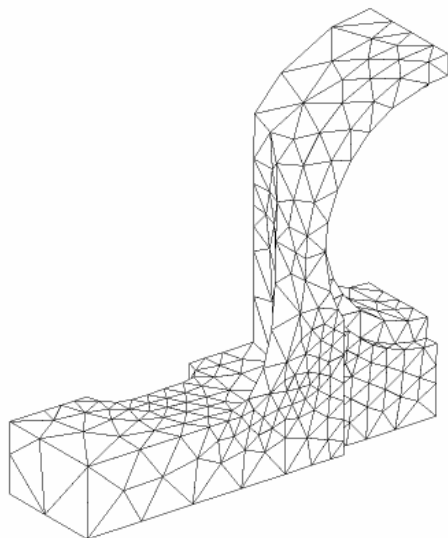


图 2-100 SIZLVL = 6 (默认)

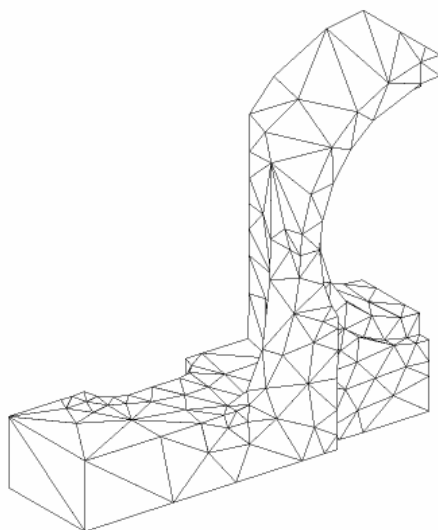


图 2-101 SIZLVL = 10 (粗)

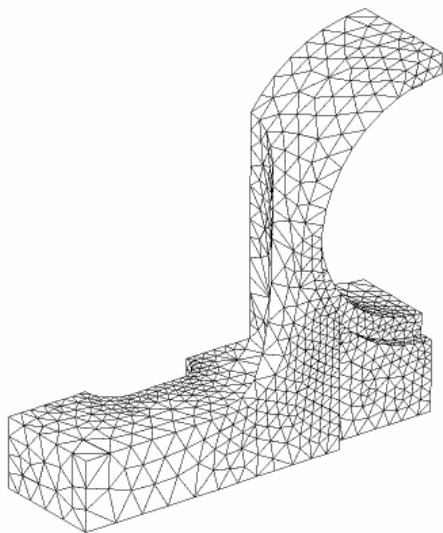


图 2-102 SIZLVL = 2 (细)

2.3.2 网格产生

1. 网格化线段

在一个线段上产生节点和线单元。

命令操作：

LMESH, NL1, NL2, NINC

NL1, NL2, NINC: 将各个线段以 NINC 为步长 (默认为 1), 从 NL1 到 NL2 网格化, 如果 NL1 = ALL, NL2 和 NINC 都忽略, 所有选择的线段都被网格化。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines (图 2-103)

2. 网格化面积

面积内建立节点和面积单元。

命令操作:

AMESH, NA1, NA2, NINC

NA1, NA2, NINC: 将各个面积以 NINC 为步长 (默认为 1), 从 NA1 到 NA2 网格化, 如果 NA1 = ALL, NA2 和 NINC 都忽略, 所有选择的面积都被网格化。

菜单路径 (图 2-104):

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Free

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Target Surf

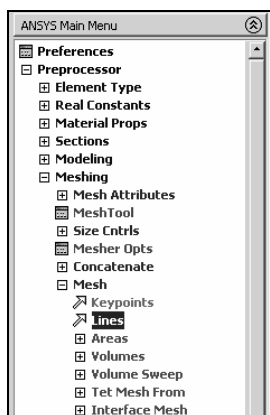


图 2-103 网格化线段

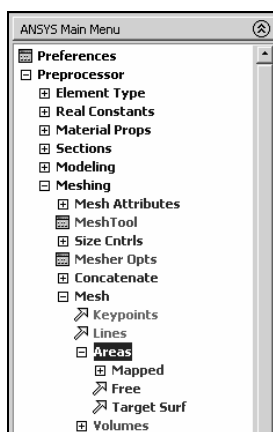


图 2-104 网格化面积

2.4 加载负载

有限元分析的主要目的就是要知道系统在加载负载之后的反应。ANSYS 中的“负载”包括边界条件和外力或者内力。

2.4.1 负载类型

负载分为 6 个类型：自由度约束、集中力、面载荷、体载荷、惯性载荷和耦合场载荷。

1. 自由度约束

自由度约束 (DOF, Degree of Freedom) 将自由度固定在一个固定值。如结构场中的位移约束。

2. 集中力载荷

集中力载荷 (Force) 是施加于模型节点上的集中力。如结构分析中的集中力。

3. 面载荷

面载荷 (Surface Load) 是施加于表面上的分布力。如结构分析中的压力。

4. 体载荷

体载荷 (Body Load) 是一个体或者场载荷。如结构分析中的温度效应。

5. 惯性载荷

惯性载荷 (Inertia Loads) 是物体的惯性性质。如重力加速度。

6. 耦合场载荷

耦合场载荷 (Coupled-field Loads) 其实就是上面一种载荷的特殊形式，即一种分析得出的结构作为另一种分析的载荷。

2.4.2 施加负载

负载类型有很多，这里只做简单介绍。

1. 自由度约束

这里介绍一个限制节点自由度的操作。

命令操作：

D, NODE, Lab, VALUE, VALUE2, NEND, NINC, Lab2, Lab3, Lab4, Lab5, Lab6

NODE: 施加约束的节点。如果选择“ALL”，NEND, NINC 都忽略，约束施加在所有选择的节点上。

Lab: 可用的自由度标签。如果选择“ALL”，使用所有合适标签。结构场常用标签有 UX, UY 或 UZ（位移）等。

Value: 自由度值或者表格边界条件索引名。

Lab2, Lab3, Lab4, Lab5, Lab6: 其他自由度标签。这些标签的值以相同的自由度值施加在节点上。

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Node Components
Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes
Main Menu→Solution→Constraints→Apply→On Nodes
Main Menu→Solution→Define
Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Node Components
Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes

第二个操作的路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，如图 2-105 所示。单击后出现图 2-106，选取要施加自由度约束的节点，单击“OK”按钮确认，出现对话框设定自由度约束值（图 2-107）。

2. 集中力载荷

这里介绍一个在节点上施加集中力载荷的操作。

命令操作：

F, NODE, Lab, VALUE, VALUE2, NEND, NINC

NODE: 施加集中力载荷的节点。

Lab: 有效集中力标签。如 FX, FY, FZ 等。

VALUE: 集中力值或者表格名称。

菜单操作(图 2-108):

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Node Components
Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes
Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Node Components
Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes

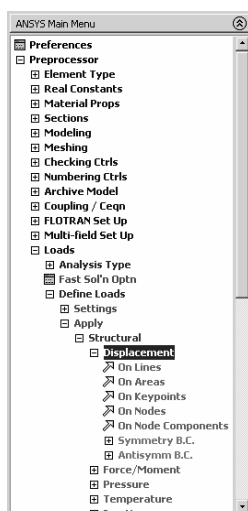


图 2-105 定义自由度

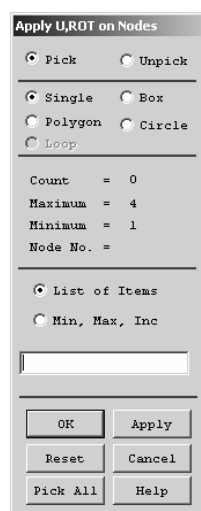


图 2-106 对节点施加自由度

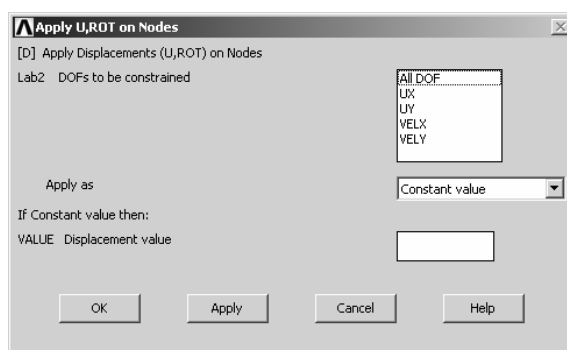


图 2-107 设定自由度约束值

如果选择“On Nodes”，出现节点拾取框（图 2-109），选择需要施加集中力的节点后，出现赋值对话框（图 2-110）。

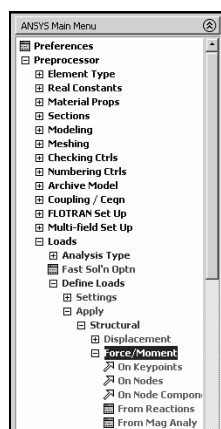


图 2-108 定义集中力

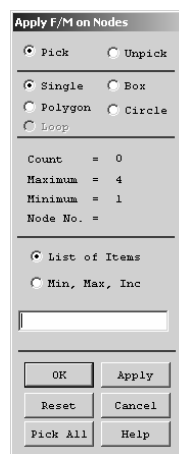


图 2-109 节点拾取框

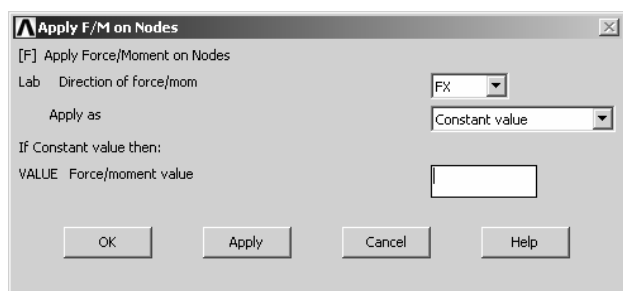


图 2-110 给节点力赋值

实例 2-3 悬臂梁网格划分和施加载荷

一个长为 l ，横截面积为 1 的悬臂梁，其上有集中力载荷 F 作用于自由端（图 2-111），有限元模型如图 2-112 所示，确定梁自由端变形 δ ，问题参数参见表 2-3。

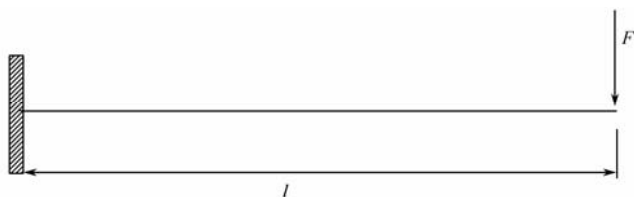


图 2-111 问题模型

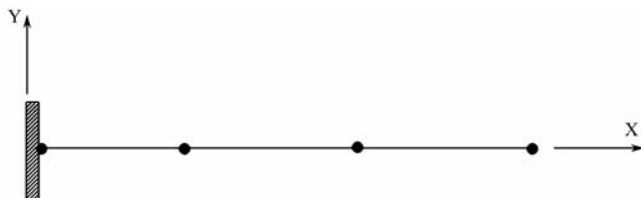


图 2-112 有限元模型

表 2-3 问题参数

材料属性	几何特征	载荷
$E = 30 \times 10^6 \text{ Pa}$	$l=10\text{m}$ $\text{HEIGHT} = 1$ $I_z = 1/12$	$F = 1000\text{N}$



结果文件

——附带光盘 “End\Ch2\实例 2-3” 文件夹



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch2\实例 2-3.avi”

3. GUI 操作

(1) 设定分析标题

选择路径 Utility Menu→File→Change Title（图 2-113），输入框中输入 “CANTILEVER BEAM”，单击 “OK” 按钮确认（图 2-114）。

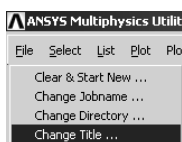


图 2-113 设定分析标题

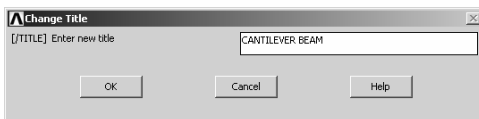


图 2-114 输入框中输入“CANTILEVER BEAM”

(2) 定义模型参数

定义单元 BEAM3。路径为 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete (图 2-115)。单击“Add/Edit/Delete”按钮,出现“Element Types”单元类型对话框(图 2-116)单击“Add...”按钮添加单元。

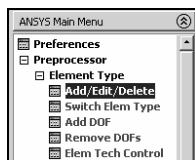


图 2-115 定义单元

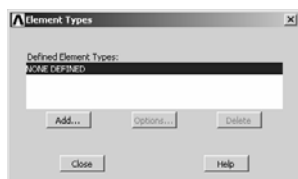


图 2-116 “Element Types”单元类型对话框

弹出“Library of Element Types”单元类型库对话框,左侧选择栏中选择“BEAM”,右侧栏中选择“2D elastic 3”(图 2-117)。

单击“OK”按钮确认后,又出现“Element Types”单元类型对话框,提示已定义 BEAM3 (图 2-118)。

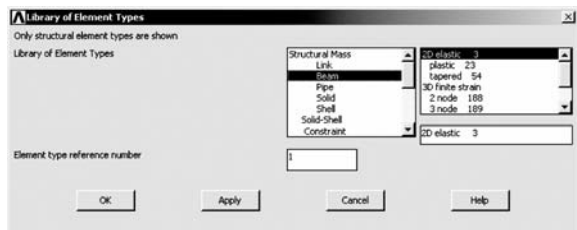


图 2-117 选择 BEAM3

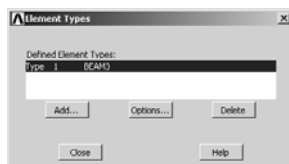


图 2-118 已定义 BEAM3

然后定义模型实常数。查看 BEAM3 资料,如下:

Real Constants

AREA - Cross-sectional area

IZZ - Area moment of inertia

HEIGHT - Total beam height

SHEARZ - Shear deflection constant

ISTRN - Initial strain

ADDMAS - Added mass per unit length

根据已知条件,可知 $AREA = 1$, $IZZ = 1/12$, $HEIGHT = 1$ 。

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Other→Real Constants→Add/Edit/Delete,出现“Real Constants”实常数对话框(图 2-119),单击“Add...”按钮添加单元(图 2-120)。



图 2-119 “Real Constants”实常数对话框

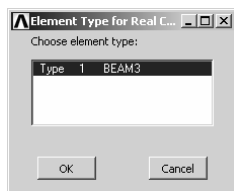


图 2-120 已添加单元

单击“OK”按钮确认，添加实常数值（图 2-121）。然后单击“OK”按钮，提示已定义的实常数组（图 2-122）。

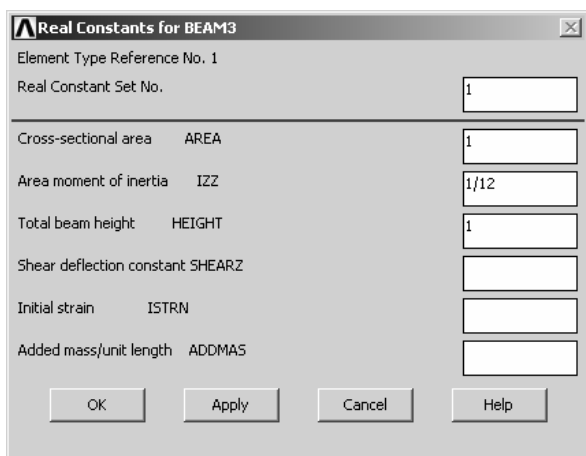


图 2-121 添加实常数值



图 2-122 已定义的实常数组

然后定义材料的杨氏模量。

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，单击后打开“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框（图 2-123）。

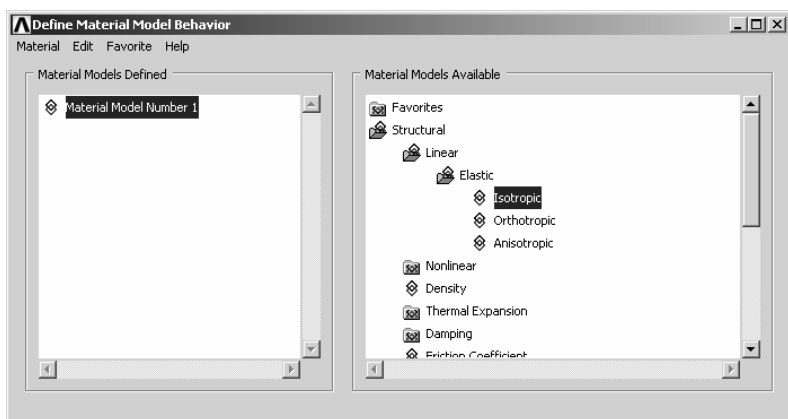


图 2-123 定义结构线性各向同性材料的 EX

右边“Material Models Available”栏中选择 Structure→Linear→Elastic→Isotropic（图 2-123），双击后在 EX 栏中输入“30E6”，单击“OK”按钮确认操作（图 2-124）。

(3) 建立实体模型

首先, 建立关键点。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS (图 2-125)。

建立第一个关键点, 输入坐标值 (图 2-126)。第二个关键点建立方法相同, 坐标为 (10,0,0)。

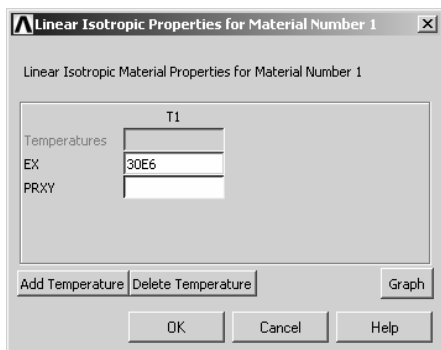


图 2-124 杨氏模量为 30E6

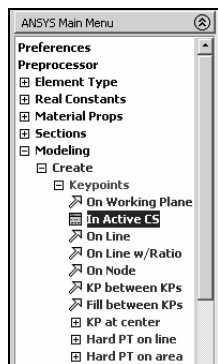


图 2-125 建立关键点

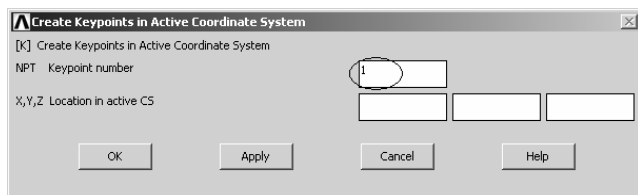


图 2-126 建立关键点 1

然后, 建立线段, 采用连接关键点为线段的方式。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord (图 2-127)。

弹出拾取框 (图 2-128), 拾取建立的两个节点建立线段。

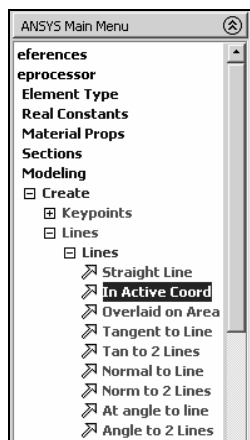


图 2-127 建立线段

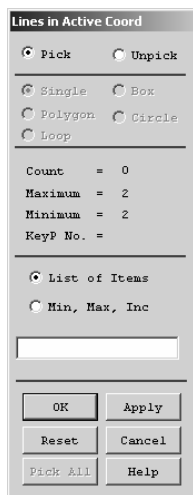


图 2-128 拾取节点建立线段

(4) 划分网格

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines (图 2-129)。出现线段拾取框(图 2-130), 选择建立的线段, 开始划分网格。

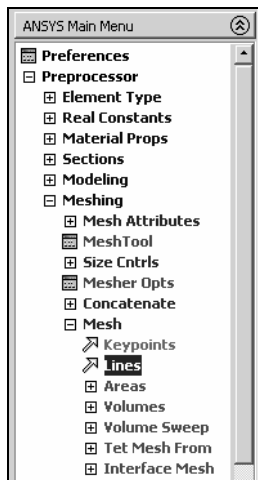


图 2-129 建立线段

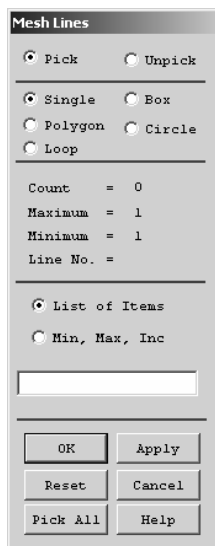


图 2-130 选择线段

划分好网格的模型如图 2-131 所示。

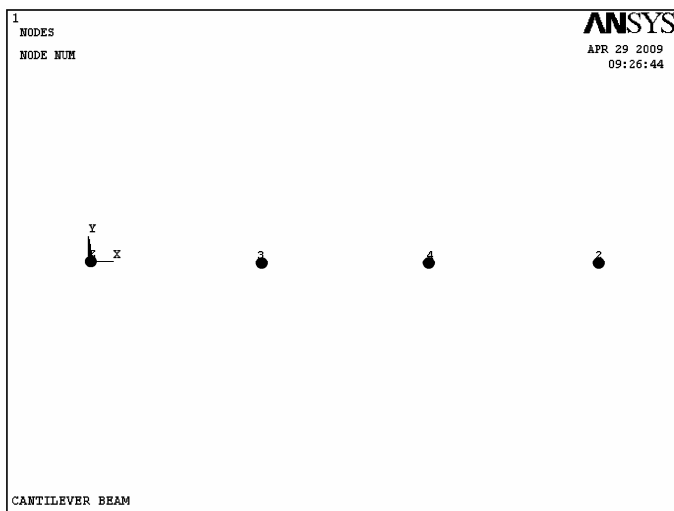


图 2-131 划分好网格的模型

(5) 施加负载

首先, 施加自由度约束。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes (图 2-132)。单击后出现图 2-133, 选取要施加自由度约束的节点 1, 单击“OK”按钮确认, 出现对话框设定自由度约束值, 选择 UX, UY 和 ROTZ (图 2-134)。

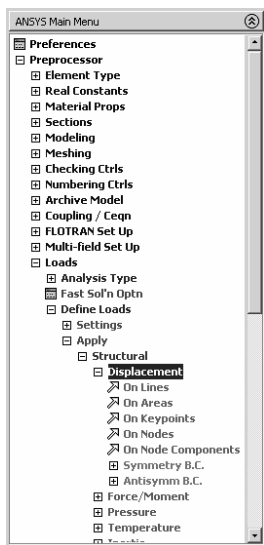


图 2-132 定义自由度

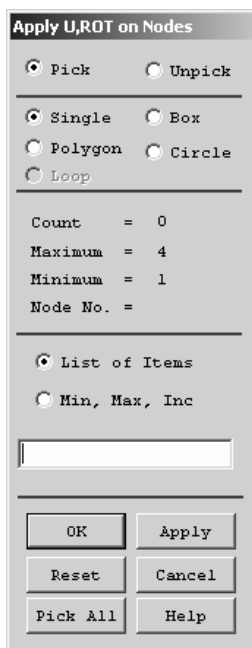


图 2-133 对节点施加自由度

然后，定义集中力载荷，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes（图 2-135）。

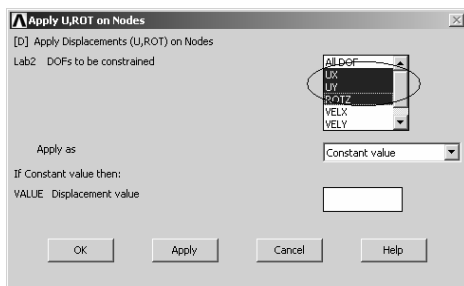


图 2-134 设定自由度约束值

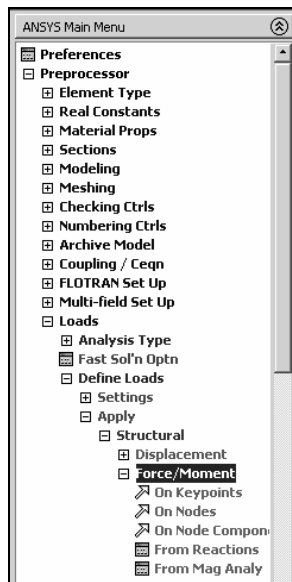


图 2-135 定义集中力

选择“On Nodes”，出现节点拾取框（图 2-136），选择需要施加集中力的节点后，出现赋值对话框（图 2-137）。

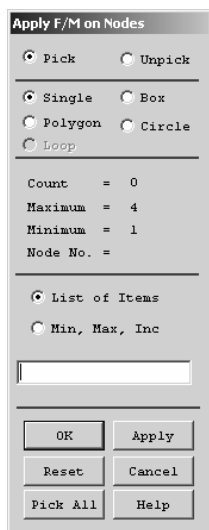


图 2-136 节点拾取框

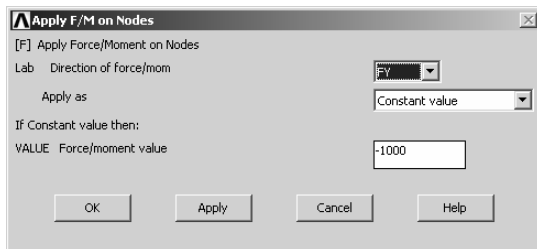


图 2-137 给节点力赋值

(6) 求解

选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，出现“Solve Current Load Step”求解当前载荷步对话框（图 2-138），提醒用户查看“/STATUS Command”（图 2-139）中列出的内容是否正确，如果正确，单击“OK”按钮确认，求解开始。



图 2-138 “Solve Current Load Step”提醒用户查看

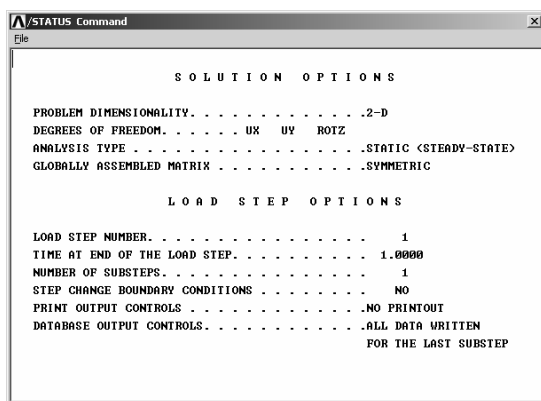


图 2-139 /STATUS Command

(7) 查看结果

选择路径 Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution，选择 Nodal Solution→Displacement vector sum，单击“OK”按钮确认（图 2-140），出现节点信息（图 2-141）。

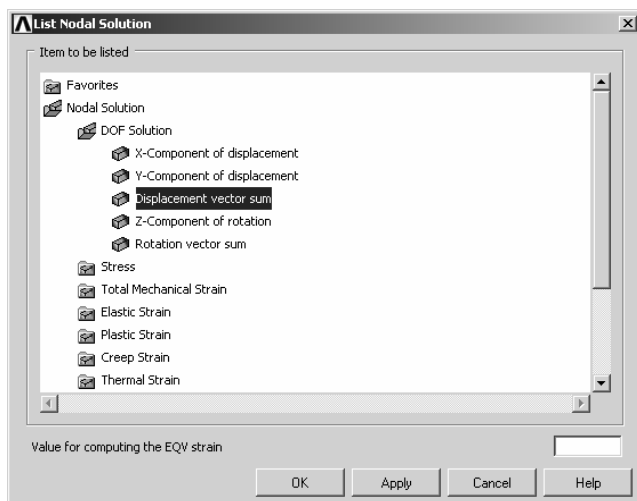


图 2-140 节点解

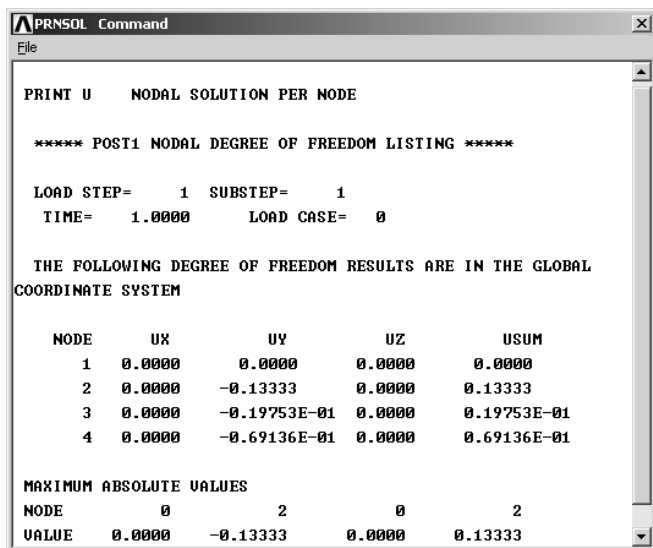


图 2-141 节点信息

得知梁中间变形 δ 为 -0.133333 。

4. 命令流操作

```

/PREP7
/TITLE, CANTILEVER BEAM
ET,1,BEAM3                ! 定义单元类型
R,1,1,1/12,1              ! 定义实常数
MP,EX,1,30E6              ! 定义材料属性
K,1                        ! 定义关键点
K,2,10

```

L,1,2	! 建立线段
LMESH,1	! 划分网格
D,1,UX,,,,,UY,ROTZ	! 定义载荷
F,2,FY,-1000	
FINISH	
/SOLU	
SOLVE	
FINISH	
/POST1	
PRNSOL,U,COMP	! 显示节点位移资料

2.5 求解

ANSYS 能够求解有限元联立方程，求解的结果：

- ① 节点的自由度值，为基本解；
- ② 原始解的导出值，为单元解。

ANSYS 程序中几种解方程的方法：直接解法、稀疏矩阵直接解法、雅可比共轭梯度法（JCG）、不完全分解共轭梯度法（ICCG）、预条件共轭梯度法（PCG）、自动迭代法（ITER）和分解块法（DDS）等。默认为直接解法。

用户可以根据模型尺寸，要求精度大小等选择合适的求解方法来求解。

选择好求解方法后，则开始求解。

命令操作：

SOLVE

菜单操作：

Main Menu→DesignXplorer VT→Solution→Solve

Main Menu→Drop Test→Solve

Main Menu→Solution→Run FLOTRAN

Main Menu→Solution→Solve→Current LS

选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS（图 2-142），出现“Solve Current Load Step”求解当前载荷步对话框（图 2-143），提醒用户查看“/STATUS Comment”（图 2-144）中列出的内容是否正确，如果正确，单击“OK”按钮确认。

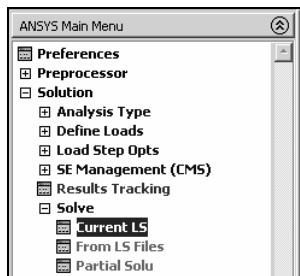


图 2-142 求解当前载荷步



图 2-143 “Solve Current Load Step”提醒用户查看

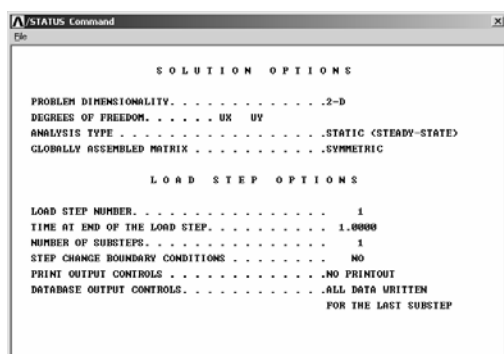


图 2-144 /STATUS Comment

2.6 后处理器

建模和求解之后，用户想要知道“这个设计可以实用吗”，“这个区域的应力有多大”等一类问题，ANSYS 后处理器可以帮助用户解答此类问题。

后处理器意味着查看分析的结果。这一步可能是整个分析过程中最重要的一步，因为用户想要知道施加的负载怎么样影响到自己的设计，自己划分的网格好用与否等。

实例 2-4 两端固定杆件求解及结果查看

本例条件同实例 1-1 及实例 2-2，这里接着实例 2-2，给出采用 ANSYS 求解及查看结果的方法。

两端固定杆件收到轴向作用力 F_1 , F_2 ，求固定端反作用力 R_1 , R_2 。图 2-142(a)为所探讨的工程系统模型，图 2-145(b)为对应的有限元模型，此模型中有四个节点，三个杆件元素。求解 R_1 , R_2 。

其中， $l = 10\text{m}$ ， $a = b = 0.3l$ ， $E = 30 \times 10^6 \text{Pa}$ ， $F_1 = 2F_2 = 1000 \text{N}$ 。

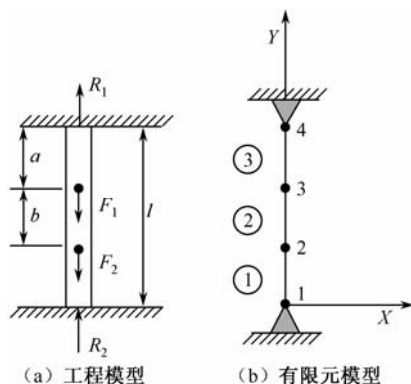





图 2-145 两端固定杆件受力分析

-  **起始文件** —— 附带光盘 “Start\Ch2\实例 2-4” 文件夹
-  **结果文件** —— 附带光盘 “End\Ch2\实例 2-4” 文件夹
-  **动画演示** —— 附带光盘 “AVI\Ch2\实例 2-4.avi”

1. GUI 操作

实例 2-2 已经建立好节点和单元，这里继续后续操作。

(1) 施加自由度约束

首先，选择路径 Main Menu → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Nodes (图 2-146)。单击后出现如图 2-147 所示，选取要施加自由度约束的节点，单击“OK”按钮确认。

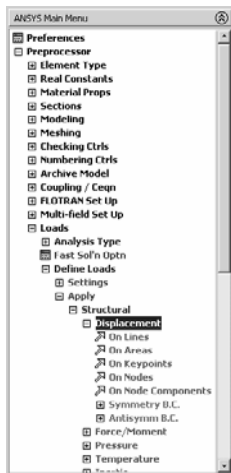


图 2-146 定义自由度

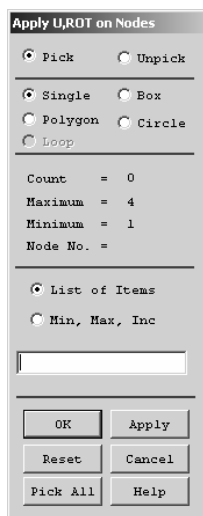


图 2-147 对节点施加自由度

然后，出现对话框设定自由度约束值（图 2-148），在“DOFs to be constrained”栏中选择“All DOF”，“Displacement value”设定为“0”。

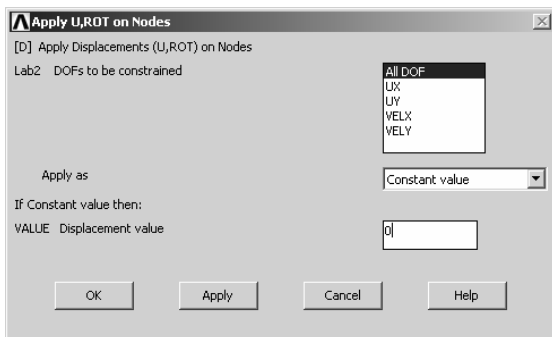


图 2-148 设定自由度约束值

单击“OK”按钮确认后，模型两端出现三角形图标，表示已施加自由度约束（图 2-149）。

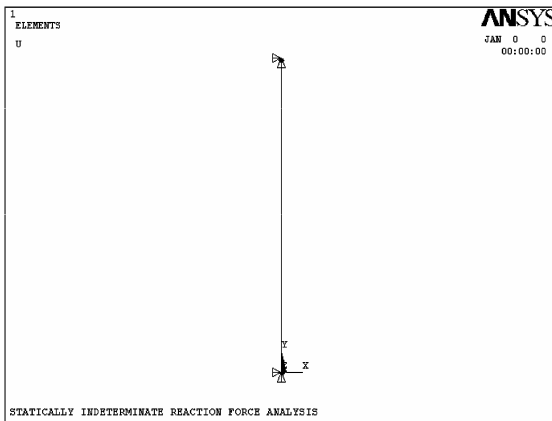


图 2-149 施加完自由度约束的模型

(2) 设定集中力载荷

节点 2 施加向下的 500N 的力。

首先, 选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Nodes (图 2-150)。出现节点拾取框 (图 2-151)。

选择节点 2, 出现赋值框, “Direction of force/mom” 集中力载荷方向栏中选择 “FY”, “Force/moment value” 集中力载荷值设定为 “-500”。单击 “OK” 按钮确认 (图 2-152)。

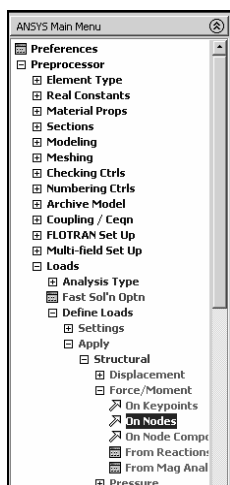


图 2-150 在节点上定义集中力载荷

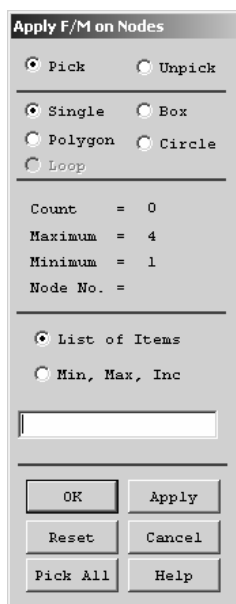


图 2-151 节点拾取框

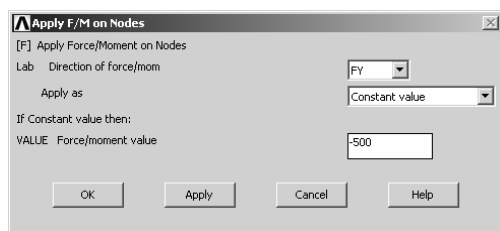


图 2-152 设定集中力载荷

同样方法设定节点 3 的集中力载荷为 “-1000”。施加完集中力载荷后的模型如图 2-153 所示, 在节点 2 和 3 上有向下的箭头表示已施加集中力载荷。

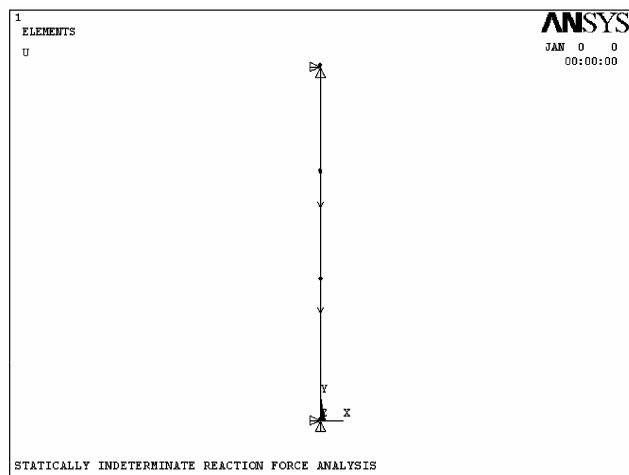


图 2-153 施加完集中力载荷的模型

(3) 求解

选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，出现“Solve Current Load Step”求解当前载荷步对话框（图 2-154），提醒用户查看“/STATUS Comment”（图 2-155）中列出的内容是否正确，如果正确，单击“OK”按钮确认，求解开始（图 2-156）。

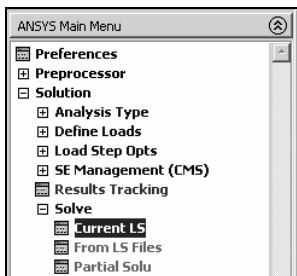


图 2-154 求解当前载荷步

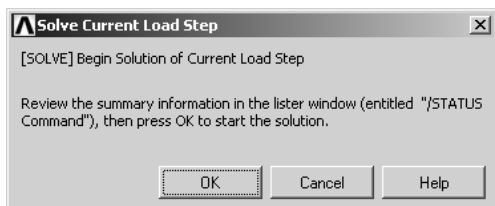


图 2-155 “Solve Current Load Step”提醒用户查看

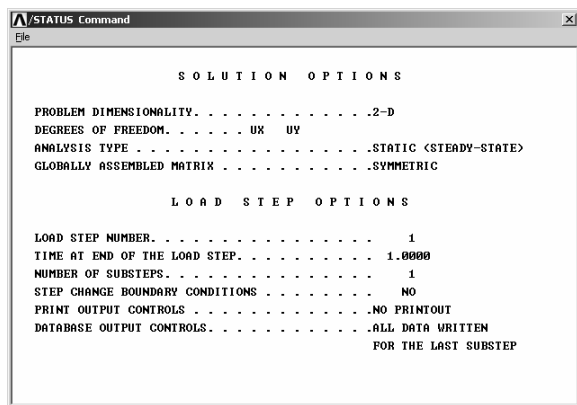


图 2-156 /STATUS Comment

(4) 在一般后处理器查看结果

选择节点 1 和节点 4，查看 R_1 ， R_2 。

首先，选择节点 1，操作路径 Utility Menu→Select→Entities（图 2-157），出现对话框选择节点 1（图 2-158）。



图 2-157 选择操作

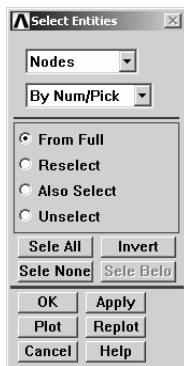


图 2-158 选择节点

然后选择路径 Main Menu→General Postproc→Nodal Calcs→Total Force Sum (图 2-59), 选择的所有节点上计算集中力 (图 2-160), 查看此处反作用力 (图 2-161), 可以看出 FY 方向为 -600。

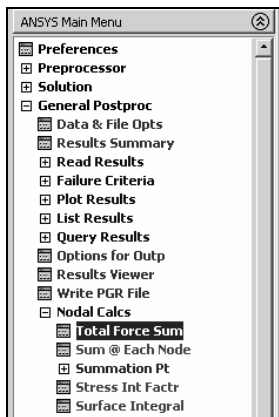


图 2-159 查看合力

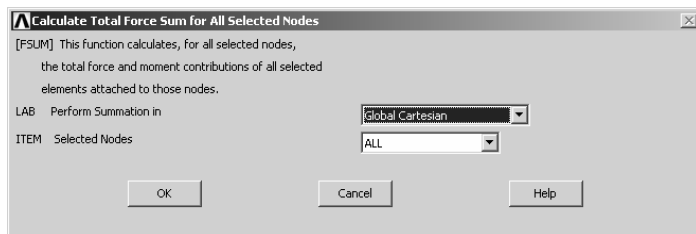


图 2-160 选择的所有节点上计算集中力

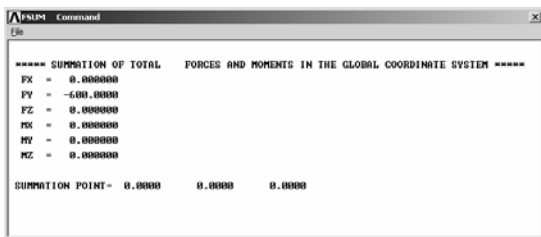


图 2-161 结果输出

同样方法查看节点 4 的反作用力 R_2 , 其值为 -900。

2. 命令流操作

```

/COM,ANSYS 11.0
C***  STATICALLY INDETERMINATE REACTION FORCE ANALYSIS
/FILNAME, 1D Modeling          ! 定义工作名称和分析标题
/TITLE, STATICALLY INDETERMINATE REACTION FORCE ANALYSIS
/PREP7                          ! 进入一般前处理器
ET,1,LINK1                     ! 定义单元 1 为 LINK1 类型
R,1,1                          ! 横截面积(任意设定) = 1
MP,EX,1,30E6                   ! 杨氏模量 = 30E6
N,1                             ! 定义节点
N,2,,4
N,3,,7
N,4,,10
E,1,2                          ! 定义单元

```

E,2,3	
E,3,4	
NPLOT,0	! 显示节点, 但是不显示节点编号
NPLOT,1	! 显示节点, 而且不显示节点编号
NLIST	! 列出节点
EPLOT	! 显示单元
ELIST	! 列出单元
D,1,ALL,,,4,3	! 节点 1 和 4 定义自由度约束
F,2,FY,-500	! 节点 2 和 3 施加集中力载荷
F,3,FY,-1000	
FINISH	! 离开一般前处理器
/SOLU	! 进入求解器
SOLVE	! 求解
FINISH	! 离开求解器
/POST1	! 进入一般后处理器
NSEL,S,NODE,,1	! 选择节点 1
FSUM	! 求节点 4 的力
NSEL,S,NODE,,4	! 选择节点 4
FSUM	! 求节点 1 的力
FINISH	! 离开一般后处理器

命令流操作说明:

(1) 注释。/COM 和 C***也是 ANSYS 的注释方法, 二者相似, 都是其后跟随注释内容, 而且会在输出窗口中。不同之处在于 C***的注释内容在输出窗口更容易识别, 因为注释内容会以 C***开头 (图 2-162)。

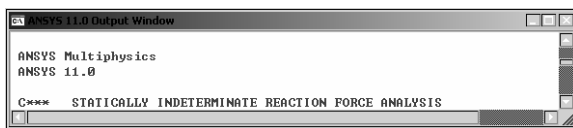


图 2-162 /COM 和 C***注释

(2) 求解结果可以在输出窗口查看 (图 2-163)。

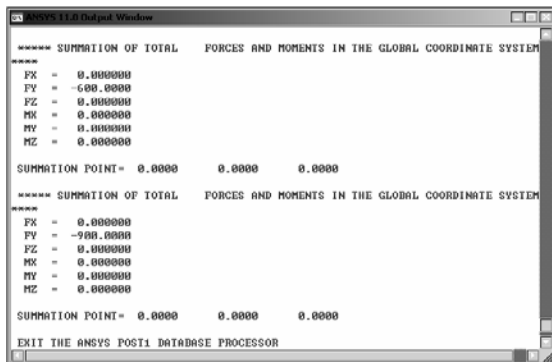


图 2-163 查看结果

2.7 分析报告概述

做完有限元分析后，有时候需要提交一份分析报告，这里简要介绍分析报告的写法。

第一步 需要简要说明使用的何种软件，此软件相比其他软件的优缺点，为何使用此软件。

第二步 描述分析的内容及分析的目标。

第三步 详细描述如何建立有限元模型，采用了何种单元，材料属性如何设定，怎样施加的负载，网格是如何划分的。

第四步 有限元分析得出的结论，是否满足目标要求。

综合实例

实例 2-5 梁应力及变形分析

一个长为 l ，横截面积为 A 的梁，其上有分布力载荷 w （图 2-164），有限元模型如图 2-165 所示。确定梁中间变形 δ ，问题参数参见表 2-4。

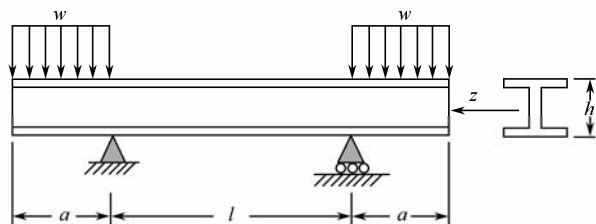


图 2-164 问题模型

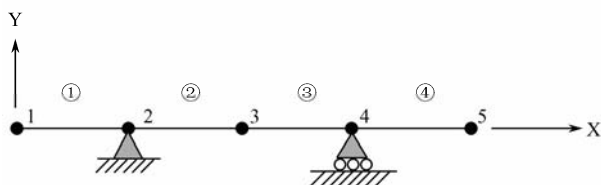


图 2-165 有限元模型

表 2-4 问题参数

材料属性	几何特征	载荷
$E = 30 \times 10^6 \text{ psi}$	$l = 240 \text{ in}$ $a = 120 \text{ in}$ $h = 30 \text{ in}$ $A = 50.65 \text{ in}^2$ $I_z = 7892 \text{ in}^4$	$w = (10000/12) \text{ lb/in}$



结果文件

——附带光盘“End\Ch2\实例 2-5”文件夹



动画演示

——附带光盘“AVI\Ch2\实例 2-5.avi”

1. GUI 操作

(1) 定义分析标题

选择路径 **Utility Menu**→**File**→**Change Title**，设定分析标题为“**BEAM STRESSES AND DEFLECTIONS**”（图 2-166）。

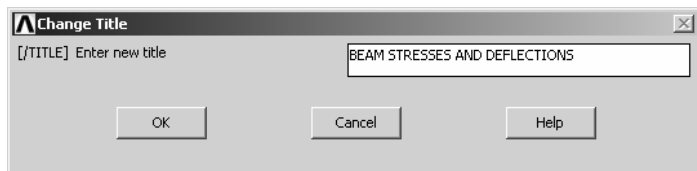


图 2-166 定义分析标题

(2) 定义模型参数

首先，设定单元。单元选择 **BEAM3**，且设定每隔 9 个单位距离输出。

选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Element Type**→**Add/Edit/Delete**，出现“**Element Types**”单元类型对话框，此处单击“**Add...**”按钮添加单元（图 2-167）。

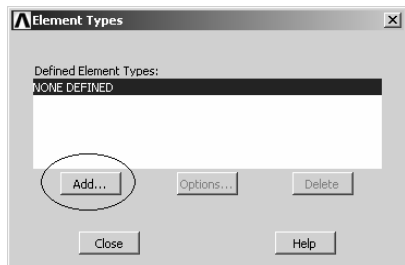


图 2-167 单击“Add...”按钮添加单元

弹出“**Library of Element Types**”单元类型库对话框，左侧选择栏中选择“**Beam**”，右侧栏中选择“**2D elastic 3**”（图 2-168）。

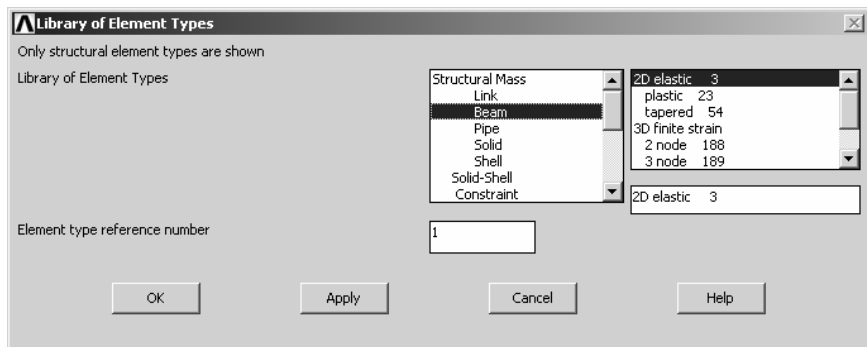


图 2-168 选择 BEAM3

单击“**OK**”按钮确认后，又出现“**Element Types**”单元类型对话框，提示已定义 **BEAM3**（图 2-169）。单击“**Options...**”按钮，在“**BEAM3 element type options**”选项对话框的 **K9** 项选择“**9 intermed pts**”，即每隔 9 个节点输出（图 2-170）。

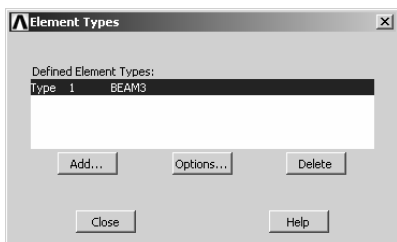


图 2-169 已定义 BEAM3

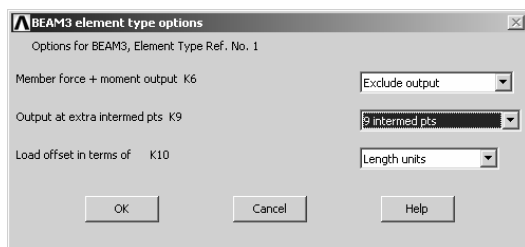


图 2-170 BEAM3 element type options

然后，定义模型实常数。查看 BEAM3 资料，可知：

Real Constants

AREA - Cross-sectional area

IZZ - Area moment of inertia

HEIGHT - Total beam height

SHEARZ - Shear deflection constant

ISTRN - Initial strain

ADDMAS - Added mass per unit length

根据已知条件，可知， $AREA = 50.56$ ， $IZZ = 7892$ ， $HEIGHT = 30$ 。

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Other→Real Constants→Add/Edit/Delete，出现“Real Constants”实常数对话框（图 2-171），单击“Add...”按钮添加单元（图 2-172）。

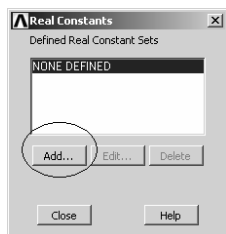


图 2-171 “Real Constants”实常数对话框

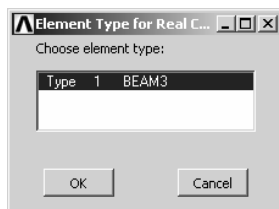


图 2-172 已添加单元

单击“OK”按钮确认，添加实常数值（图 2-173）。然后单击“OK”按钮，提示已定义的实常数组（图 2-174）。

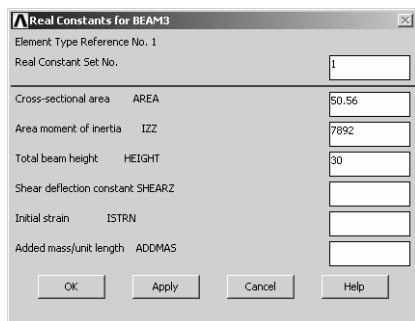


图 2-173 添加实常数值



图 2-174 已定义的实常数组

然后，定义材料的杨氏模量。

选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**，单击后打开“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框（图 2-175）。

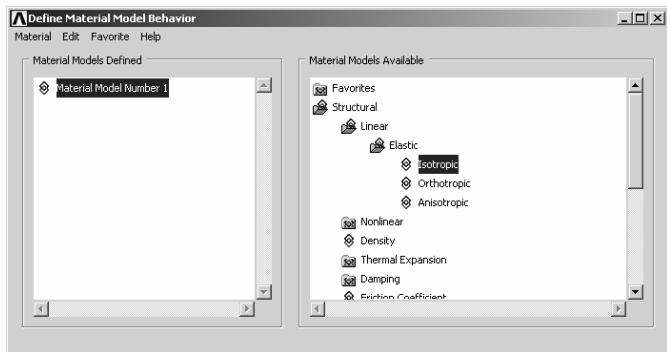


图 2-175 定义结构线性各向同性材料的 EX

右边“Material Models Available”栏中选择路径 **Structure**→**Linear**→**Elastic**→**Isotropic**，双击后在 EX 栏中输入“30E6”，单击“OK”按钮确认操作（图 2-176）。

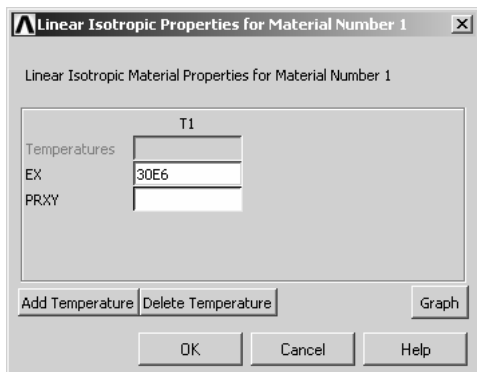


图 2-176 杨氏模量为 30E6

（3）定义节点

第一个节点位置为 0，第五个节点位置为 480，其他节点均匀填充其中。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Nodes**→**In Active CS**，建立第一个（图 2-177）和第五个节点（图 2-178）。

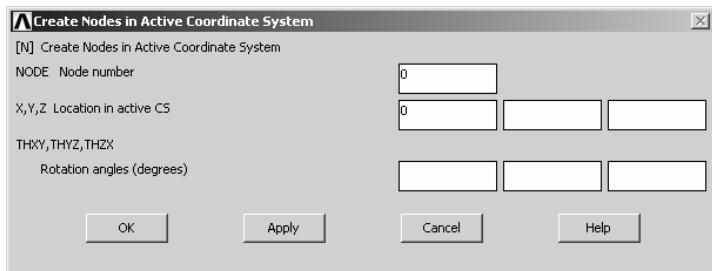


图 2-177 第一个节点

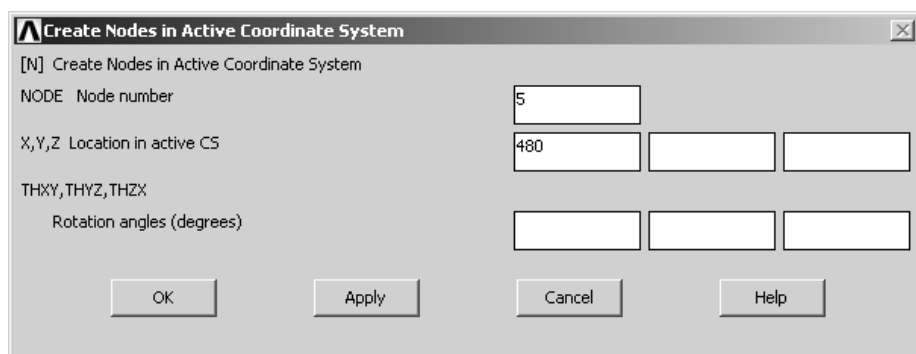


图 2-178 第五个节点

然后填充其他节点，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Fill between Nds，填充节点（图 2-179），拾取节点 1 和节点 5。单击“OK”按钮确认，保持默认选项，自动定义其他节点（图 2-180）。

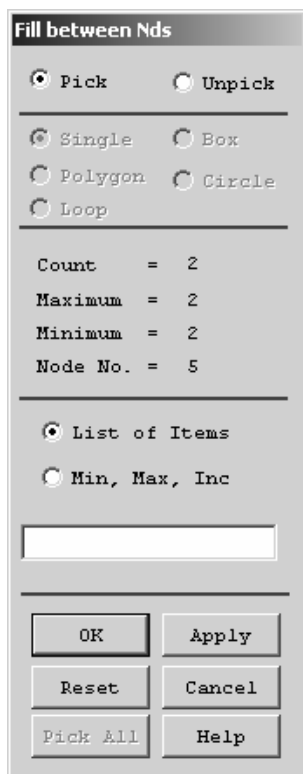


图 2-179 前充其他节点

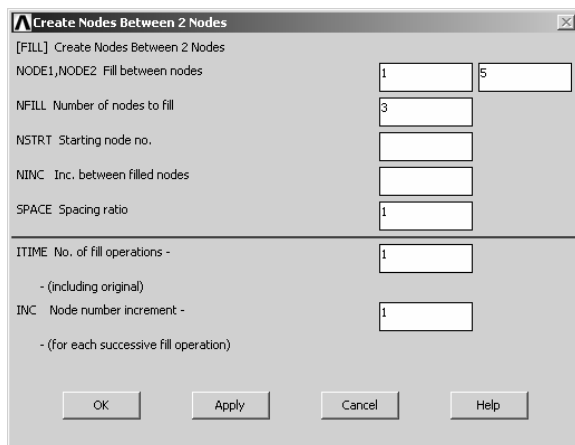


图 2-180 定义其他节点

（4）建立单元，连接节点建立单元

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes，单击“Thru Nodes”后，弹出“Elements from Nodes”由节点建立单元对话框（图 2-181）。通过在图形界面拾取节点建立单元（图 2-182）。

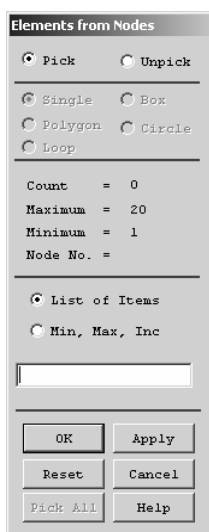


图 2-181 “Elements from Nodes” 对话框

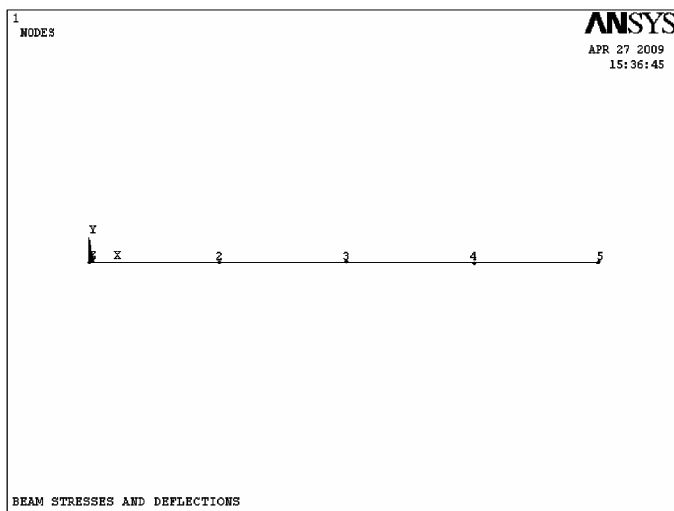


图 2-182 建立好的单元

(5) 施加负载

首先，施加自由度约束。节点 2 约束 X,Y 方向，节点 4 约束 Y 方向。

第一步，施加节点 2 自由度约束，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes。单击后出现图 2-183，选取要施加自由度约束的节点 2，单击“OK”按钮确认。

第二步，出现对话框设定自由度约束值（图 2-184），“DOFs to be constrained” 栏中选择“UX”和“UY”，“Displacement value”设定为“0”。同样方法设定节点 4 的自由度约束。

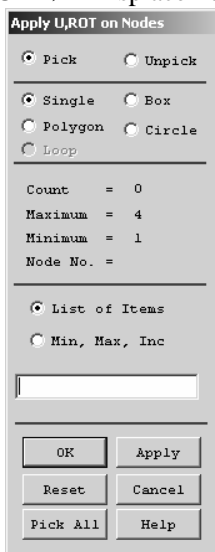


图 2-183 对节点施加自由度

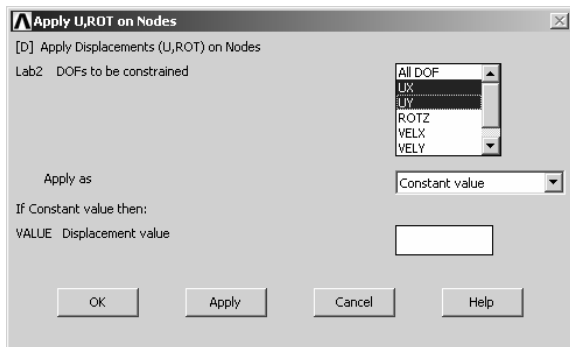


图 2-184 设定自由度约束值

然后，施加分布力载荷。单元 1 和单元 4 的分布力载荷都为 $1E4/12$ 。选择路径 Main

Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Beams, 选取单元 1 和单元 4 后, VALI 后填写 “1E4/12” (图 2-185)。

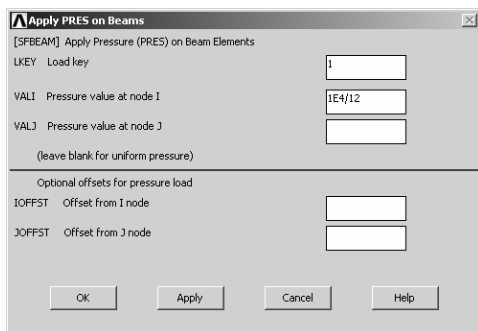


图 2-185 定义分布力载荷

添加完载荷的模型如图 2-186 所示。



图 2-186 添加完载荷的模型

(6) 求解

选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 出现 “Solve Current Load Step” 求解当前载荷步对话框 (图 2-187), 提醒用户查看 “/STATUS Comment” (图 2-188) 中列出的内容是否正确, 如果正确, 单击 “OK” 按钮确认, 求解开始。

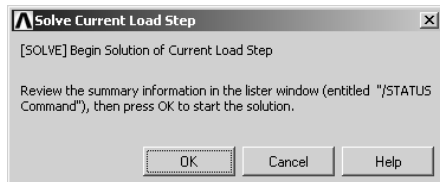


图 2-187 “Solve Current Load Step” 提醒用户查看

(7) 查看结果

选择路径 Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution, 选择 Nodal Solution→Displacement vector sum, 单击 “OK” 按钮确认 (图 2-189), 出现节点信息 (图 2-190)。

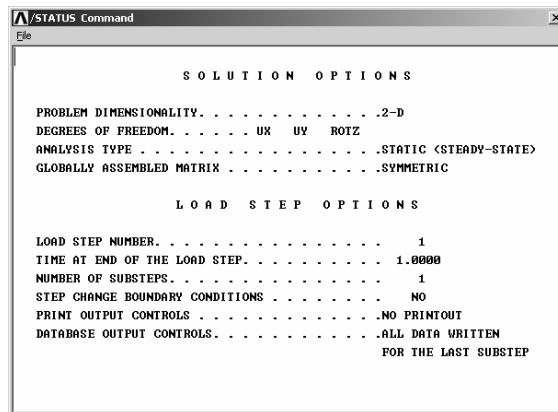


图 2-188 /STATUS Comment

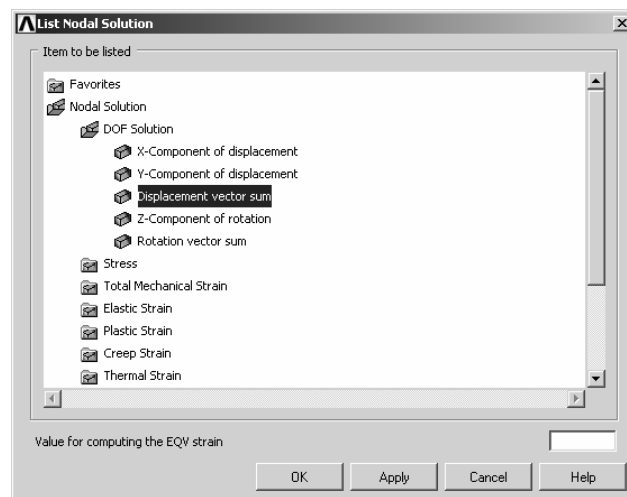


图 2-189 节点解

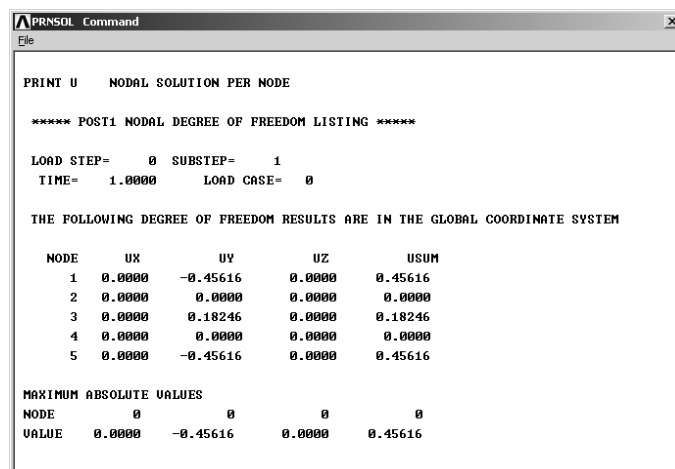


图 2-190 节点信息

得知梁中间变形 δ 为 0.18246。

2. 命令流操作

```

/COM,ANSYS 11.0
/PREP7
/TITLE, BEAM STRESSES AND DEFLECTIONS
ET,1,BEAM3
KEYOPT,1,9,9                ! 每隔 9 个单位距离输出
R,1,50.65,7892,30
MP,EX,1,30E6
N,1                          ! 定义节点和单元
N,5,480
FILL                          ! 节点 1 和节点 5 之间填充节点
E,1,2
E,2,3
E,3,4
D,2,UX,,,,,UY              ! 定义载荷
D,4,UY
SFBEAM,1,1,PRES,(10000/12)
SFBEAM,4,1,PRES,(1E4/12)
FINISH
/SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
PRNSOL,U,COMP              ! 显示节点位移资料
FINISH

```

实例 2-6 矩形平板受力变形分析

一个矩形平板，其末端有集中力载荷 F （图 2-191），确定末端变形 δ 。问题参数参见表 2-5。

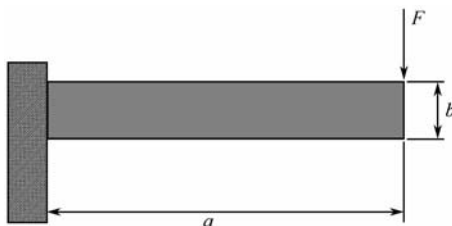
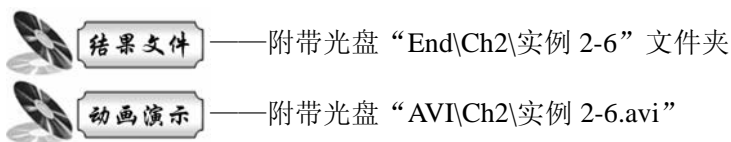


图 2-190 问题模型

表 2-5 问题参数

材料属性	几何特征	载 荷
$E = 30 \times 10^6 \text{ Pa}$	$a = 0.1\text{m}$ $b = 0.03\text{m}$	$F = 100\text{N}$



1. GUI 操作

(1) 设定分析标题

设定分析标题 (图 2-192), 输入框中输入 “Structure”, 单击 “OK” 按钮确认 (图 2-193)。

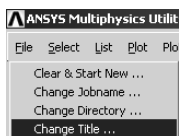


图 2-192 设定分析标题

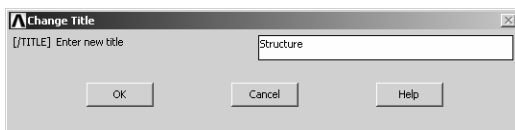


图 2-193 输入框中输入 “Structure”

(2) 定义单元类型

定义单元 Plane42。路径为 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete (图 2-194)。单击 “Add/Edit/Delete”, 出现 “Element Types” 单元类型对话框 (图 2-195) 单击 “Add...” 按钮添加单元。

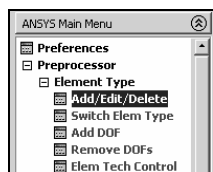


图 2-194 定义单元

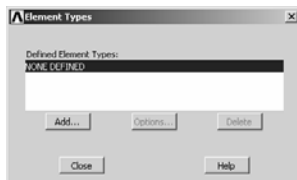


图 2-195 “Element Types” 单元类型对话框

之后出现 “Library of Element Types” 单元类型库对话框, 在左侧选择栏中选择 “Solid”, 右侧选择栏中选择 “Quad 4node 42”, 此即为 PLANE42 单元。单击 “OK” 按钮, 完成定义如图 2-196 所示, 单击 “Close” 按钮完成单元定义 (图 2-197)。

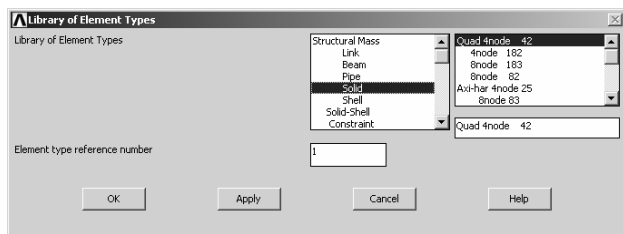


图 2-196 单元类型库

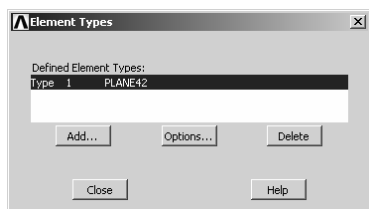


图 2-197 单元类型 PLANE42

(3) 定义材料属性

选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**，单击后打开“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框。

定义材料的杨氏模量 EX 和泊松比 PRXY。右边“Material Models Available”栏中选择 **Structure**→**Linear**→**Elastic**→**Isotropic**（图 2-198），双击后在 EX 栏中输入“6E11”，PRXY 栏中输入“0.3”（图 2-199）。单击“OK”按钮确认操作。

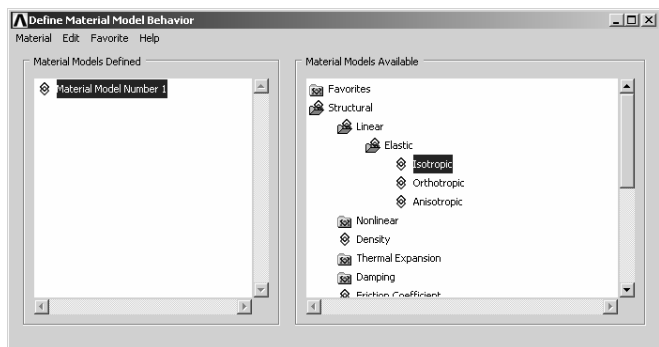


图 2-198 定义结构线性各向同性材料的 EX 和 PRXY

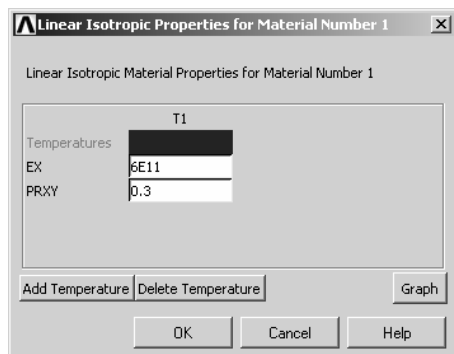


图 2-199 设定 EX 和 PRXY 值

(4) 建立实体模型

首先，建立关键点。关键点坐标：关键点 1 (0,0,0)，关键点 2 (0,0.03,0)，关键点 3 (0.1,0.03,0)，关键点 4 (0.1,0,0)。

建立关键点 1。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Keypoints**→**In Active CS**。输入坐标值（图 2-200）。其他关键点建立方法相同。

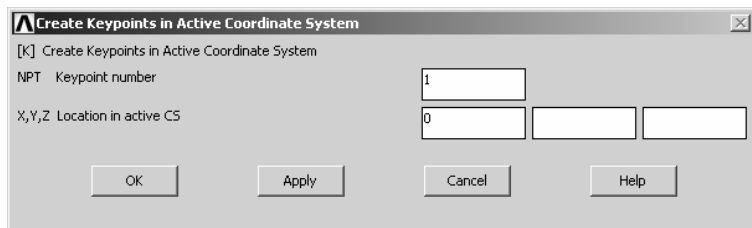


图 2-200 建立关键点 1

然后，连接关键点建立面积。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs。连续拾取关键点 1,2,3,4，建立面积（图 2-201）。

（5）网格化模型

首先，用智能单元大小控制设定单元大小。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→SmartSize→Basic，选择默认值“6”（图 2-202）。

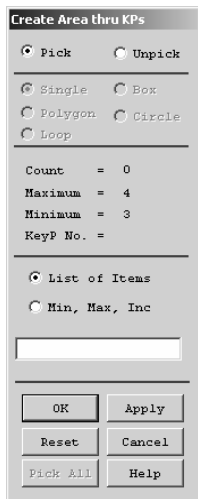


图 2-201 拾取关键点建立面积

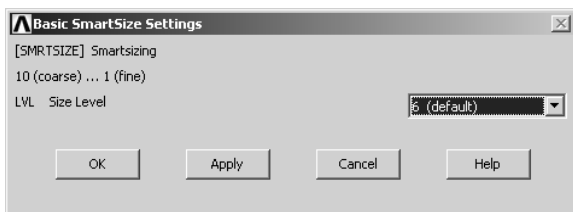


图 2-202 用智能单元大小控制设定单元大小

然后，划分网格。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Free。拾取要划分网格的面（图 2-203）。单击“OK”按钮划分网格（图 2-204）。

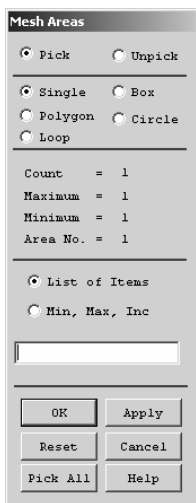


图 2-203 拾取面

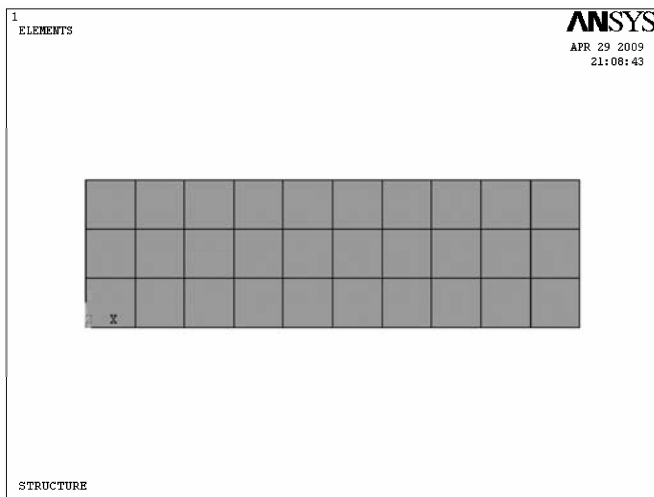


图 2-204 划分完网格的模型

（6）施加负载

首先，定义自由度约束，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines。选择线段 1（图 2-205），单击“OK”按钮确认。选择“ALL DOF”对所有自由度施加约束（图 2-206）。

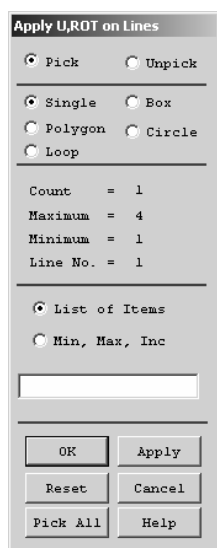


图 2-205 线段拾取, 选择线段 1

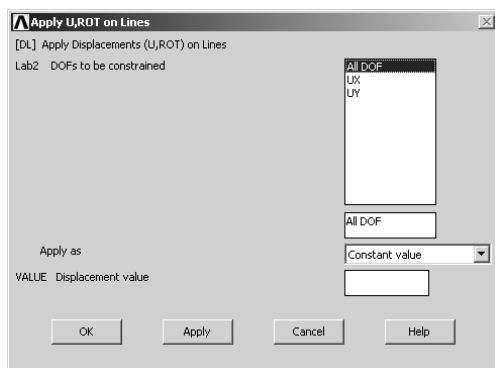


图 2-206 对所有自由度施加约束

然后, 定义集中力载荷。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Keypoints。出现关键点拾取对话框 (图 2-207), 拾取关键点 3。单击“OK”按钮确认。

弹出对话框中设置集中力值, “Lab”选择“FY”, “VALUE”填入“-100”。单击“OK”按钮确认 (图 2-208)。

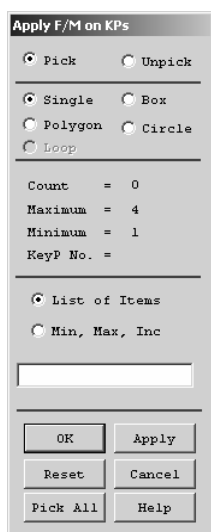


图 2-207 关键点拾取框

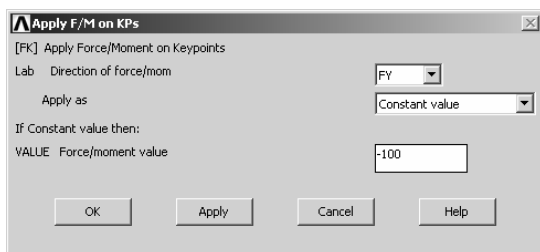


图 2-208 设置集中力值

(7) 求解

选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS, 出现“Solve Current Load Step”求解当前载荷步对话框 (图 2-209), 提醒用户查看“/STATUS Comment”(图 2-210)中列出的内容是否正确, 如果正确, 单击“OK”按钮确认, 求解开始。

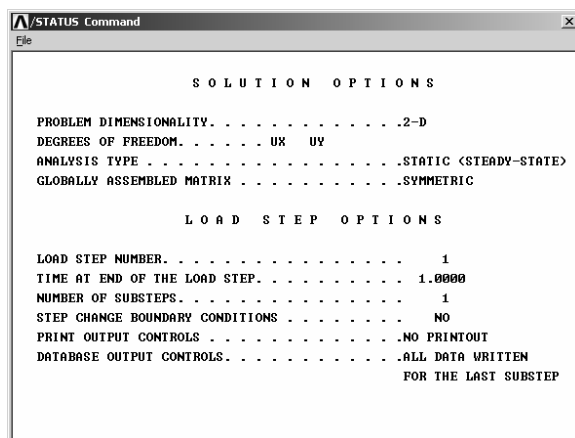


图 2-209 “Solve Current Load Step”
提醒用户查看

图 2-210 /STATUS Comment

(8) 查看结果

选择路径 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape，选择“Def+undef edge”，单击“OK”按钮确认（图 2-211）。变形结果如图 2-212 所示。

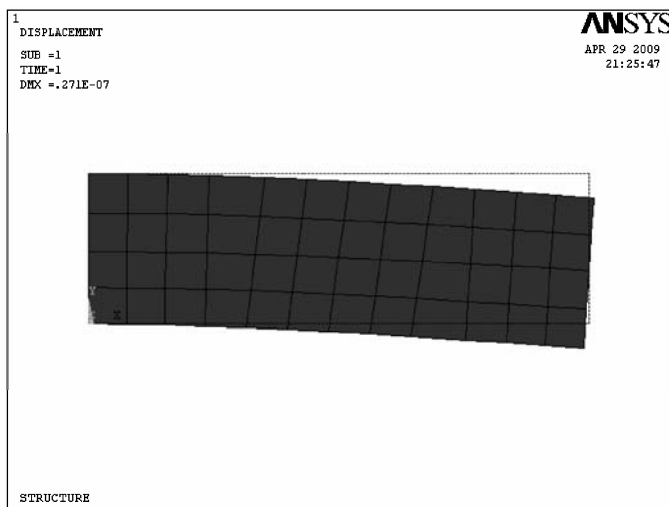
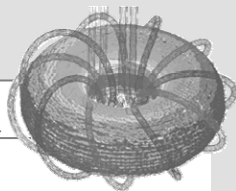


图 2-211 绘制变形结果

图 2-212 变形结果图示

2. 命令流操作

```
/PREP7                                ! 进入一般前处理器
/TITLE, Structure                       ! 设定分析名称为 Structure
ET, 1, PLANE42                          ! 定义编号为 1 的单元类型为 PLANE42
MP, EX, 1, 6E11                         ! 定义杨氏模量，泊松比
MP, PRXY, 0.3
K, 1                                    ! 定义关键点
K, 2, 0, 0.03
K, 3, 0.1, 0.03
K, 4, 0.1, 0
A, 1, 2, 3, 4                           ! 建立面积
SMRTSIZE, 6                             ! 只能网格大小控制
AMESH, 1                                ! 划分网格
DL, 1, 1, ALL                           ! 定义载荷
FK, 3, FY, -100
FINISH
/SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
PLDISP, 2                               ! 显示模型变形
FINISH
```



第3章 建立电磁场有限元模型

本章介绍了如何建立电磁场有限元模型。首先介绍了 ANSYS 中的坐标系，然后进一步介绍了节点和单元操作，例如，复制、删除等操作，以降低有限元模型建立的工作量。然后介绍如何给磁场和电场施加负载，求解后如何查看分析结果。本章通过大量实例使读者初步对使用 ANSYS 分析电磁场有一定了解。



本章内容

- 坐标系
- 节点操作
- 单元操作
- 负载定义
- 求解和后处理器



本章案例

- 简单二维平行板电容——生成节点
- 永磁铁回路——生成节点
- 简单二维平行板电容——求解，查看结果
- 永磁铁回路——建立单元，设定负载
- 简单二维平行板电容——求解，查看结果
- 永磁铁回路——求解，查看结果
- 二维平行板电容
- 正方形环形磁铁回路

3.1 坐标系

用 ANSYS 建立有限元模型是在某种坐标系中完成的，有时候用户需要根据具体模型，建立自己的坐标系或者删除某个坐标系。为了方便读者，本节简单介绍 ANSYS 中的坐标系，重点介绍一下总体坐标系和局部坐标系。

3.1.1 坐标系简介

用 ANSYS 建立有限元模型是在某种坐标系中完成的。ANSYS 使用几种不同的坐标系，每种有不同的用途。

- ① 总体坐标和局部坐标用来确定几何图形（节点、关键点等）的位置；
- ② 显示坐标系决定几何图形列出或者显示的系统；
- ③ 节点坐标系定义每个结点的自由度方向和节点结果数据；
- ④ 单元坐标系定义材料特性和单元结果数据；
- ⑤ 结果坐标系用来将节点或者单元数据转换为其他特定坐标系以列出、显示或者做一般后处理。

3.1.2 总体坐标系和局部坐标系

总体坐标系和局部坐标系用来确定几何图形的位置。默认情况下，用户定义的节点或者关键点都是处于总体笛卡儿坐标系下的。

1. 总体坐标系

总体坐标系可看成是一个绝对参考系。ANSYS 提供三种总体坐标系：笛卡儿坐标系（图 3-1），柱坐标系（图 3-2，图 3-4）和球坐标系（图 3-3）。各种坐标系参见表 3-1。

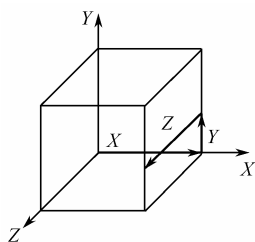


图 3-1 笛卡儿坐标系

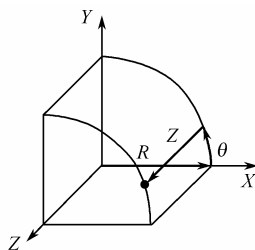


图 3-2 柱坐标系 (Z)

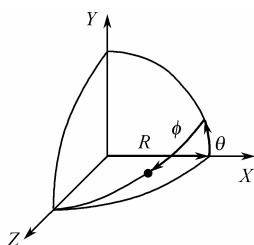


图 3-3 球坐标系

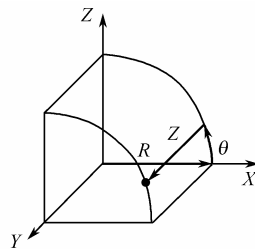


图 3-4 柱坐标系 (Y)

表 3-1 各种坐标系

坐标形式	参 数	编 号
笛卡儿坐标系	X, Y, Z	0
柱坐标系 (Z)	R, θ, Z	1
球坐标系	R, θ, ψ	2
柱坐标系 (Y)	R, θ, Y	5

2. 局部坐标系

在许多情况中，用户也需要建立自己的坐标系，即局部坐标系，它的原点不是总体坐标系的原点。

在总体坐标系中建立局部坐标系的方法如下所述。

命令操作：

LOCAL, KCN, KCS, XC, YC, ZC, THXY, THYZ, THZX, PAR1, PAR2

KCN: 任意大于 10 的赋予该坐标的编号。（小于等于 10 的编号有其他意义，详见 CSYS 命令的 KCN）。

KCS: 坐标系类型。

0 or CART: 直角坐标系。

1 or CYLIN: 柱坐标系。

2 or SPHE: 球坐标系。

XC,YC,ZC: 新的坐标系原点在总体坐标系中的位置。

菜单操作 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At Specified Loc（图 3-5）。

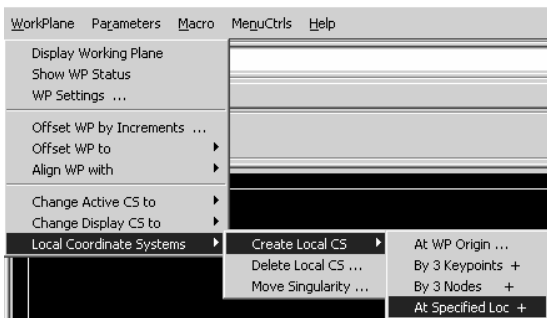


图 3-5 在整体坐标系中建立局部坐标系

在出现的对话框中可以输入坐标值也可以采用鼠标拾取方式，但是为了准确起见，一般采用输入坐标值的方式，例如，输入“1,1,0”，则把坐标原点移到了总体坐标系中的(1,1,0)（图 3-6）。单击“OK”按钮确认后，则可以具体设定各项参数（图 3-7）。

当一个局部坐标系建立之后，它就变为当前激活的坐标系。当定义了一个局部坐标系后，用户赋予其一个大于等于 11 的编号，可以采用 CSYS 命令或者其等价的菜单操作来选取各个定义的局部坐标系。

如果想要删除一个已定义的局部坐标系，可以采用如下方法。
命令操作：

CSDELE, KCN1, KCN2, KCINC

KCN1,KCN2,KCINC: 删除编号从 KCN1（必须大于 10），以 KCINC（默认为 1）为步长，到 KCN2（默认为 KCN1）的所有局部坐标系。如果 KCN1 = ALL，KCN2 和 KCINC 忽略，删除所有坐标系。

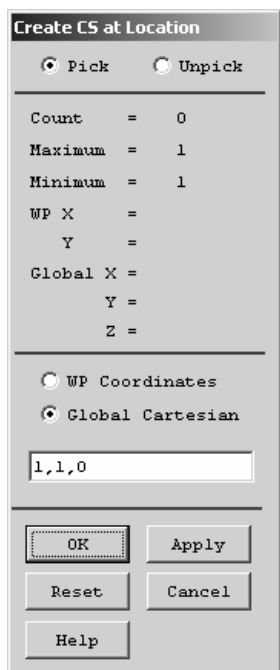


图 3-6 坐标原点移动到 (1,1,0)

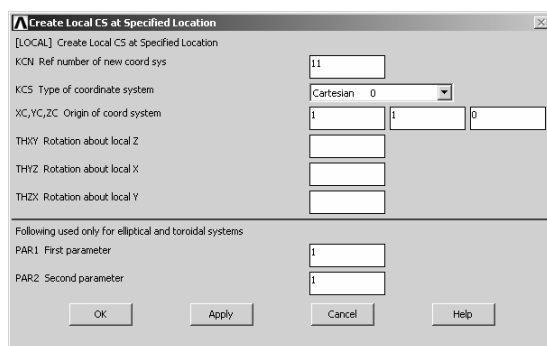


图 3-7 当前坐标中的特定位置建立局部坐标系

命令操作 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Delete Local CS（图 3-8）。然后选择要删除的局部坐标系（图 3-9），单击“OK”按钮确认。

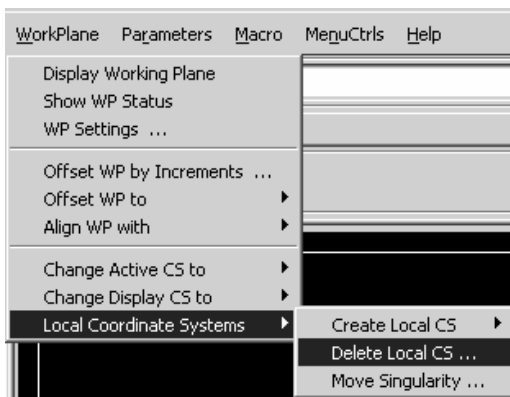


图 3-8 删除局部坐标系

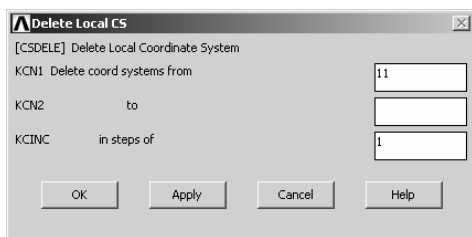


图 3-9 选择要删除的局部坐标系

3. 激活的坐标系

用户可以定义任意多个自己的坐标系，但是其中只有一个是激活的。激活的坐标系由以下决定：开始，默认情况下总体坐标系是激活的。每当用户定义一个局部坐标系，此新定义的坐标系就自动变成了激活的坐标系。如果用户需要激活其中一种总体坐标系或者之前定义的坐标系，可以采用以下方法。

命令操作：

CSYS, KCN

其中，KCN 是各种坐标系的编号，可以是整体坐标系的编号（表 3-1），也可以是用户自己定义的坐标系的编号（大于等于 11）。

菜单操作（图 3-10）：

Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cartesian
Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cylindrical
Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Spherical
Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Specified Coord Sys
Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Working Plane

3.2 节点操作

ANSYS 有限元建模的方法有两种：实体建模（Solid Modeling）和直接建模（Direct Generation）。直接建模需要用户自己定义节点，建立有限元模型。在第 2 章中已经介绍过了节点的定义方法。而 ANSYS 有一些方便的操作可以简化用户操作，例如，复制已有节点和填充节点等。这里介绍节点的删除、复制和填充等操作。

3.2.1 节点的删除

命令操作：

NDELE, NODE1, NODE2, NINC

NODE1,NODE2,NINC：删除编号从 NODE1（必须大于 10），以 NINC（默认为 1）为步长，到 NODE2（默认为 NODE1）的所有局部坐标系。如果 NODE1=ALL，NODE2 和 NINC 忽略，删除所有节点。

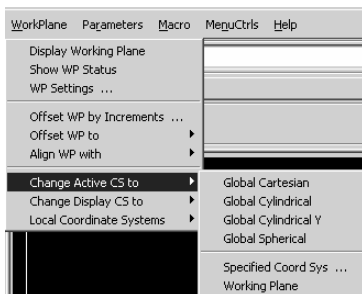


图 3-10 激活某种坐标系



ANSYS 命令参数常有“初值、末值、步长”形式的，此类参数设置基本一致，如 CSDELE 和 NDELE 的此部分参数。

菜单操作

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Nodes

出现“Delete Nodes”删除节点框，选取要删除的节点（图 3-11）。

3.2.2 节点的其他生成方法

节点除了可以直接建立外，还可以采用如节点复制，填充等操作来生成。

1. 节点填充

节点填充是在两个已定义节点之间填充节点。

命令操作：

FILL, NODE1, NODE2, NFILL, NSTRT, NINC, ITIME, INC, SPACE

NODE1, NODE2: 填入的起始和结尾节点。

NFILL: 在 NODE1 和 NODE2 之中填入 NFILL 个节点，必须为正数。

NSTRT: 第一个填入的节点的节点编号（默认为 NODE1 + NINC）。

NINC: 此增量加到剩下要填入的节点编号（可以为正数也可以为负数）。默认为 $(\text{NODE2} - \text{NODE1}) / (\text{NFILL} + 1)$ ，即线性填充。如果不填，则自动设定为“1”。

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Fill between Nds

通过出现的节点拾取框（图 3-12），选择节点。

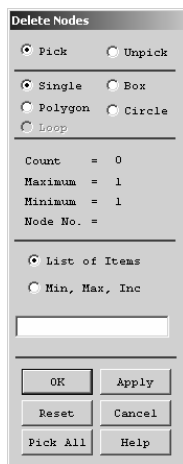


图 3-11 删除节点

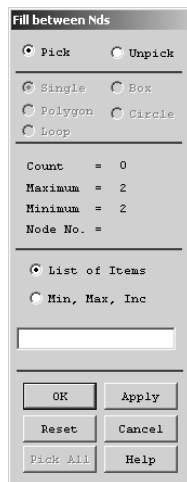


图 3-12 在拾取的节点之间填充节点

如果选择节点 1 和节点 2，则出现“Create Nodes Between 2 Nodes”在两个节点之间建立节点对话框，默认值如图 3-13 所示。

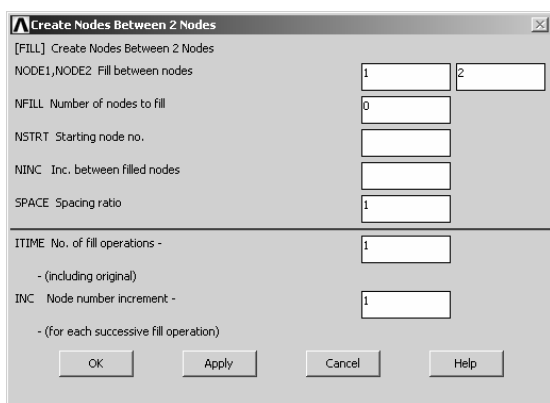


图 3-13 在两个节点之间建立节点对话框

2. 节点复制

以给定的节点图案复制节点，此过程在激活坐标系中完成。

命令操作：

NGEN, ITIME, INC, NODE1, NODE2, NINC, DX, DY, DZ, SPACE

ITIME: 复制次数，包括当前节点图形本身。

INC: 每次复制时节点编号增量。

NODE1, NODE2, NINC: 复制编号从 NODE1（必须大于 10），以 NINC（默认为 1）为步长，到 NODE2（默认为 NODE1）的所有局部坐标系。如果 NODE1 = ALL，NODE2 和 NINC 忽略，删除所有节点。

DX, DY, DZ: 节点位置。

菜单操作

Main Menu → Preprocessor → Modeling → Copy → Nodes → Copy

选择要复制的节点（图 3-14）。

如果选取了从节点 1~节点 4 四个节点，则出现如图 3-15 所示对话框。

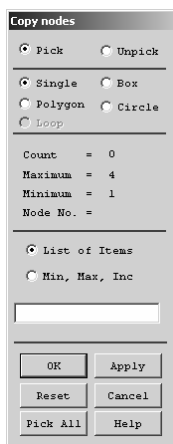


图 3-14 选择要复制的节点

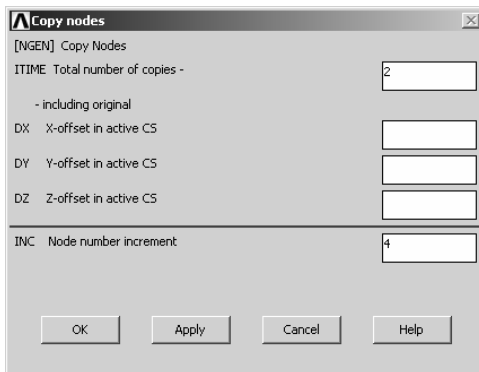


图 3-15 填入复制节点参数

实例 3-1 二维平行板电容节点的生成

建立一个二维平行板电容器（图3-16），其长度为 $l = 1\text{m}$ ，两极板之间的距离为 $g = 0.5\text{m}$ ，电介质上半部为空气，下半部为相对介电常数为 2 的电介质，电压为 $U = 5\text{V}$ ，求空气中的电场强度 E 。

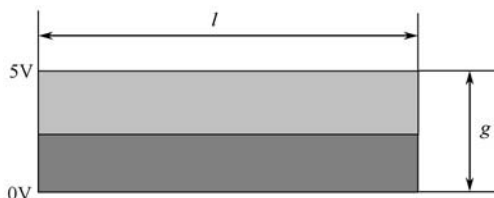


图 3-16 简单二维平行板电容



结果文件

——附带光盘“Ch3\实例 3-1”文件夹



动画演示

——附带光盘“AVI\Ch3\实例 3-1.avi”

1. GUI 操作

(1) 设定图形界面的使用偏好

操作方法 Main Menu→Preferences，弹出“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“Electric”（图 3-17），这样可以过滤不需要的图形工作菜单，简化后续操作。

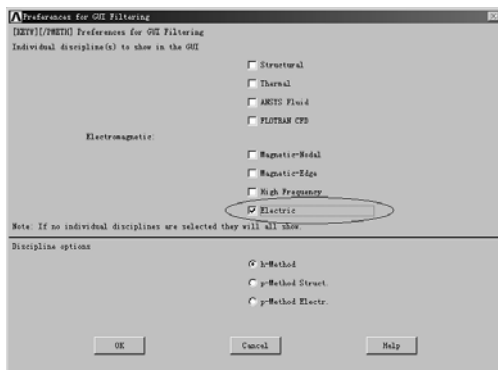


图 3-17 设定使用偏好

(2) 定义模型参数

首先，定义单元。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，出现“Element Types”单元类型对话框，此处单击“Add...”按钮添加单元（图 3-18）。

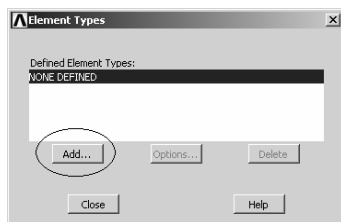


图 3-18 单击“Add...”按钮添加单元

弹出“Library of Element Types”单元类型库对话框，左侧选择栏中选择“Electrostatic”，右侧栏中选择“2D Quad 121”（图 3-19）。

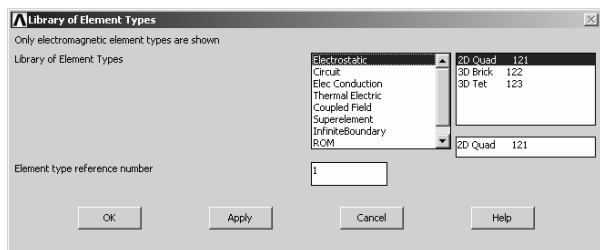


图 3-19 选择 PLANE121

单击“OK”按钮后，出现“Element Types”单元类型对话框，提示已定义 PLANE121（图 3-20）。单击“Close”按钮关闭。

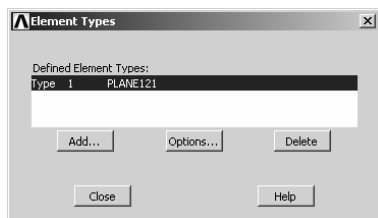


图 3-20 已定义 PLANE121

然后，定义材料属性，定义电介质的相对介电常数。

首先，定义材料 1 的相对介电常数。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，单击后打开“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框（图 3-21）。

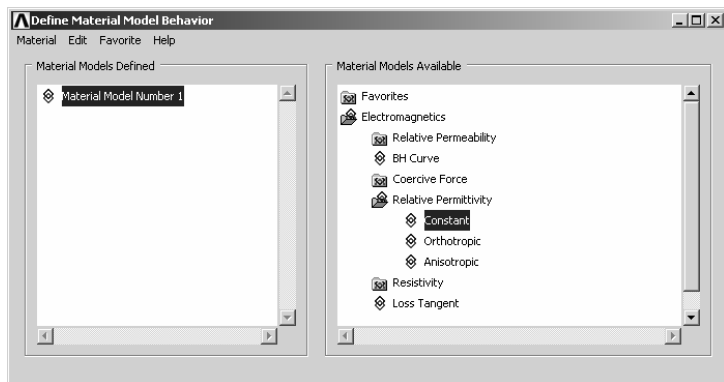


图 3-21 定义材料模型性质对话框

右边“Material Models Available”栏中选择路径 Electromagnetics→Relative Permittivity→Constant，双击打开对话框定义材料 1 的相对介电常数（图 3-22）。

然后，定义材料 2 的相对介电常数。定义完材料 1 的相对介电常数后，“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框选择“Material→New Model...”（图 3-23），单击打开“Define Material ID”定义材料 ID 对话框，输入“2”（图 3-24）。

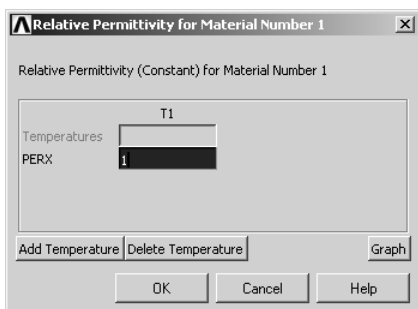


图 3-22 材料 1 的相对介电常数值

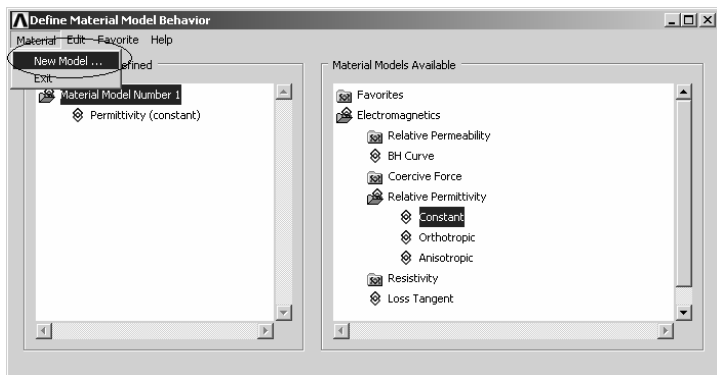


图 3-23 定义新材料

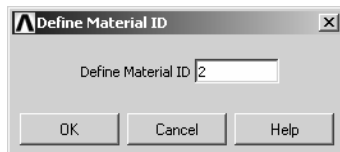


图 3-24 定义材料 ID 对话框

然后，选择新定义的材料 2，采用定义材料 1 的相对介电常数的方法，定义材料 2 的相对介电常数（图 3-25 和图 3-26）。关闭“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框，完成定义。

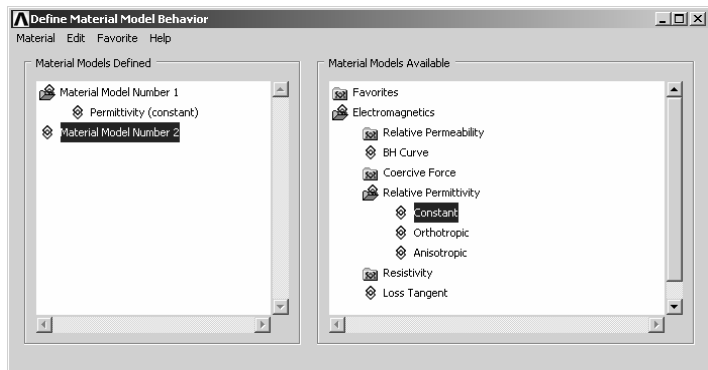


图 3-25 定义材料 2 的相对介电常数

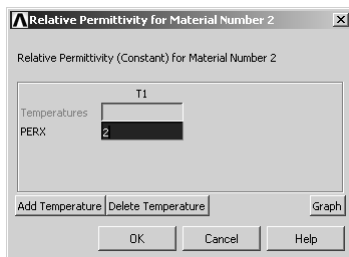


图 3-26 材料 2 的相对介电常数值

（3）建立节点

第一个节点位置为 0，第四个节点位置为 1，其他节点均匀填充其中。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS，建立第一个（图 3-27）和第四个节点（图 3-28）。

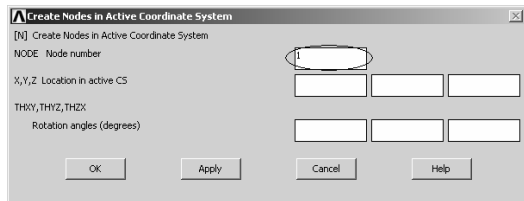


图 3-27 第一个节点

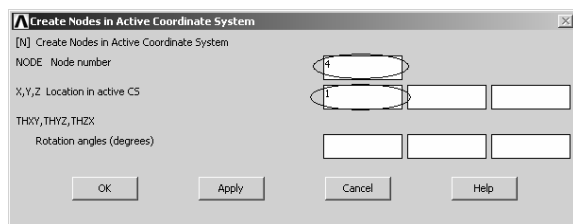


图 3-28 第四个节点

填充其他节点，选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Nodes**→**Fill between Nds**，填充节点，拾取节点 1 和节点 4。单击“OK”按钮确认，保持默认选项，自动定义其他节点（图 3-29）。

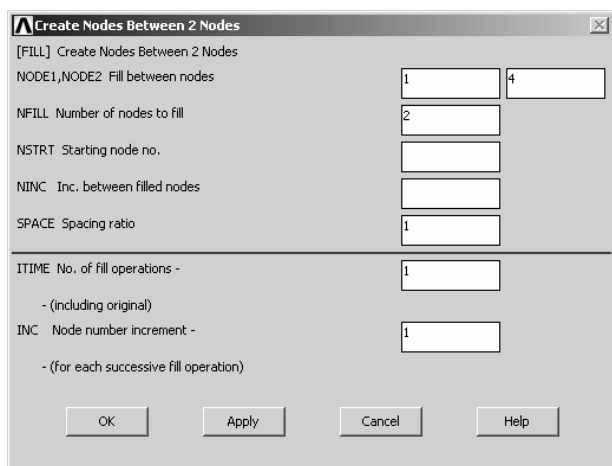


图 3-29 填充其他节点

复制节点，选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Copy**→**Nodes**→**Copy**。单击打开“Copy nodes”复制节点对话框，“ITIME”复制总数后输入“3”，“DY”Y 方向相对位移填入“0.25”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮确认操作（图 3-30）。

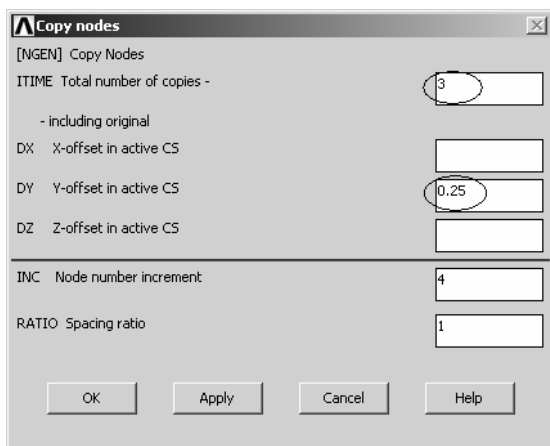


图 3-30 复制节点对话框

2. 命令流操作

```

/PREP7
ET,1,PLANE121          ! 定义单元
MP,PERX,1,1             ! 定义电介质的相对介电常数
MP,PERX,2,2
N,1                     ! 建立节点 1
N,4,1                   ! 建立节点 4
FILL                    ! 填充节点
NGEN,3,4,1,4,,,0.25    ! 复制节点

```

命令流操作说明:

当模型中有不同模型参数, 如材料类型时, 采用赋予参数编号的方式来定义, 如 MP,PERX,1,1, MP,PERX,2,2 定义两种材料的相对介电常数, 则分别编号为 1 和 2。

实例 3-2 永磁铁回路节点的生成

由铁心和永磁铁组成的永磁铁回路, 其中有两段空气间隙 (图 3-31)。参数设置如下所述。

永磁铁:

$B_r = 1 \text{ T}$
 $H_c = 150,000 \text{ A/m}$
 $\mu_r = 5.305$

铁心:

$\mu_r = 1 \times 10^5$

几何参数:

$h = 0.3 \text{ m}$
 $w = 0.3 \text{ m}$
 $t = 0.1 \text{ m}$
 $a = 0.1 \text{ m}$

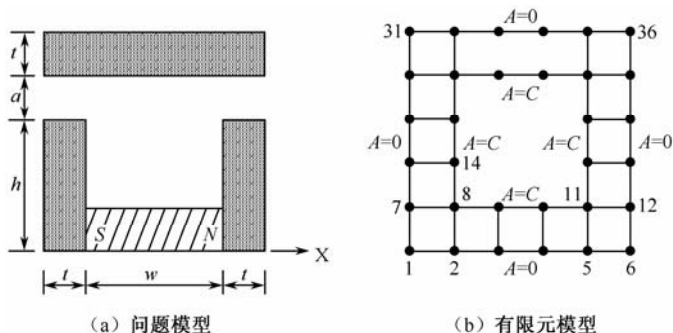
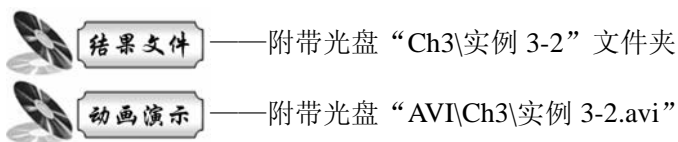


图 3-31 永磁铁回路



1. GUI 操作

(1) 设定图形界面的使用偏好

操作方法 Main Menu→Preferences, 弹出“Preferences for GUI Filtering”对话框, 选择“Magnetic-Nodal”(图 3-32), 这样可以过滤不需要的图形工作菜单, 简化后续操作。

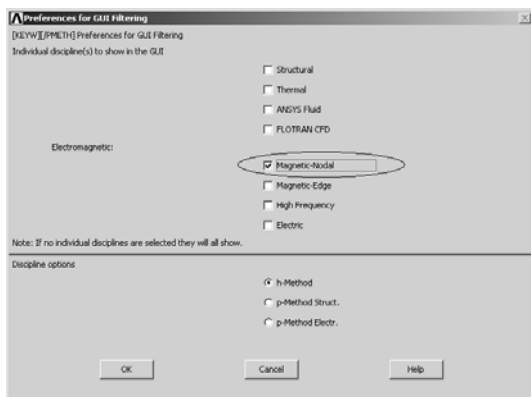


图 3-32 设定使用偏好为 Magnetic-Nodal

(2) 定义模型参数

首先定义单元类型。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/ Delete, 出现“Element Types”单元类型对话框, 此处单击“Add...”按钮添加单元(图 3-33)。

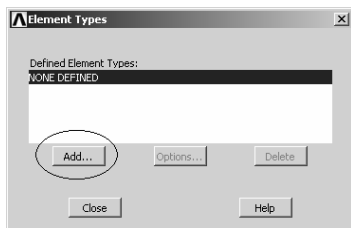


图 3-33 单击“Add...”按钮添加单元

弹出“Library of Element Types”单元类型库对话框, 左侧选择栏中选择“Magnetic Vector”, 右侧选择栏中选择“Vect Quad 4nod13”(图 3-34)。

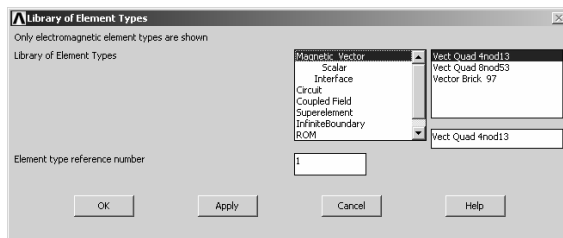


图 3-34 定义单元 PLANE13

单击“OK”按钮确认后,出现“Element Types”单元类型对话框,提示已定义 PLANE13(图 3-35)。单击“Close”按钮关闭。

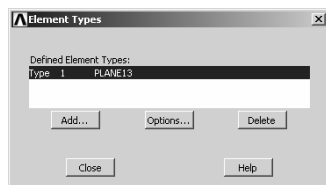


图 3-35 已定义 PLANE13

然后设定单位系统。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Electromag Units。选择“MKS system”(图 3-36)。

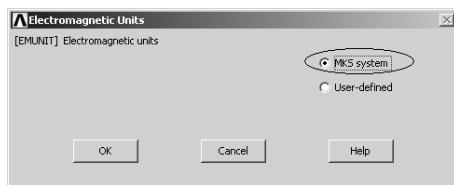


图 3-36 设定单位系统

然后设定材料属性。设定空气(材料1)、铁心(材料2)和永磁铁(材料3)的相对磁导率。

首先设定空气的相对磁导率。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models, 单击后打开“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框(图 3-37)。

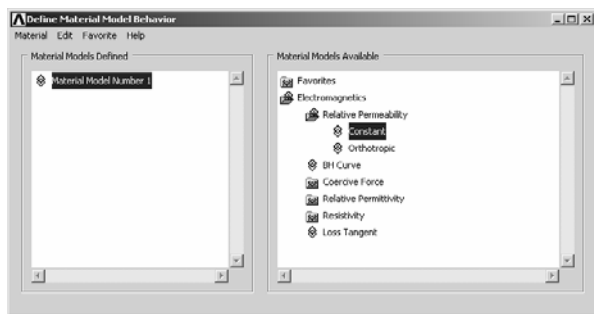


图 3-37 设定相对磁导率

选择“Electromagnetics→Relative Permeability→Constant”, 双击打开对话框定义空气相对磁导率, 输入“1”(图 3-38)。单击“OK”按钮确认。

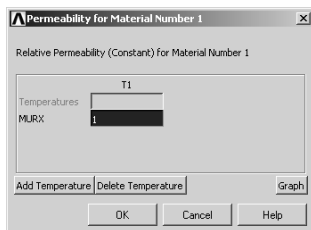


图 3-38 定义空气相对磁导率

然后定义材料 2 的相对磁导率。定义完材料 1 的相对磁导率后，“Define Material Model Behavior” 定义材料模型性质对话框，选择“Material→New Model...”（图 3-39），单击打开“Define Material ID” 定义材料 ID 对话框，输入“2”（图 3-40）。

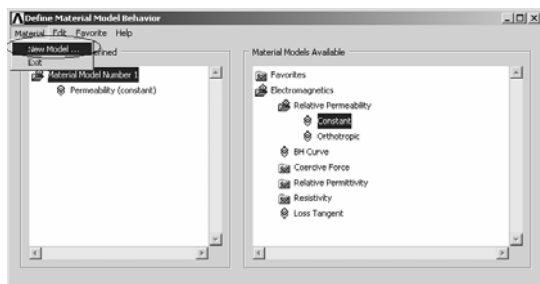


图 3-39 定义新材料

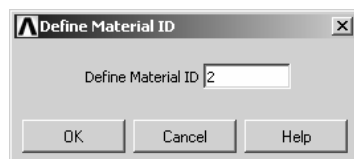


图 3-40 定义材料 ID 对话框

与材料 3 的建立方法相同。然后选择新定义的材料 2 和 3，采用定义材料 1 的相对磁导率的方法，分别定义材料 2 和 3 的相对磁导率，其值分别为 $1E5$ 和 5.30504 。关闭“Define Material Model Behavior” 定义材料模型性质对话框，完成定义（图 3-41）。

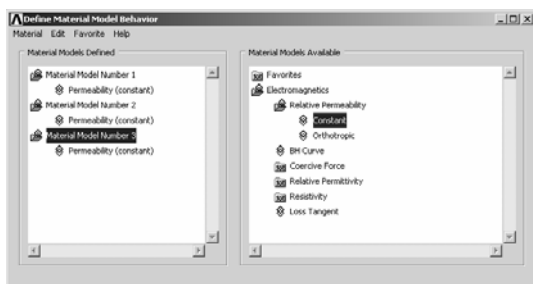


图 3-41 完成相对磁导率的定义

最后定义永磁铁即材料 3 的矫顽力。选择路径 Electromagnetics→Coercive Force→Constant（图 3-42），双击打开对话框，定义矫顽力大小为 149990.0（图 3-43）。

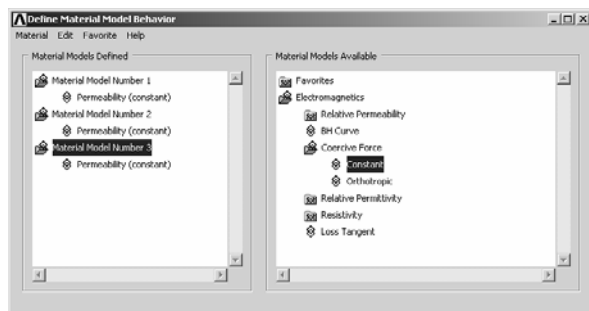


图 3-42 定义永磁铁即材料 3 的矫顽力

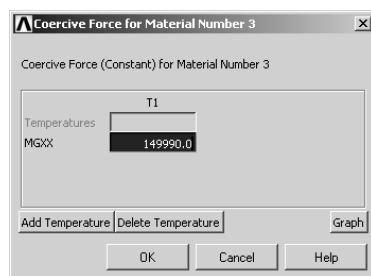


图 3-43 输入矫顽力值

（3）建立节点

第一个节点位置为 0，第六个节点位置为 $5e-2$ ，其他节点均匀填充其中。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS，建立第一个节点（图 3-44）和第六个节点（图 3-45）。

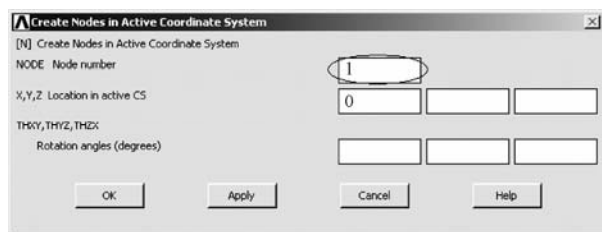


图 3-44 第一个节点

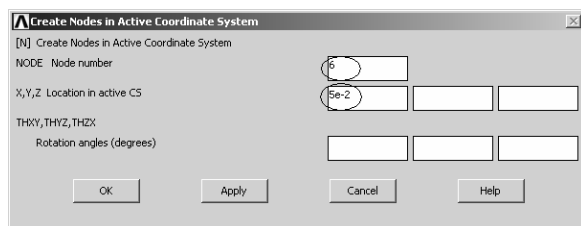


图 3-45 第六个节点

然后填充其他节点，选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Nodes**→**Fill between Nds**，填充节点，拾取节点 1 和节点 6。单击“OK”按钮确认，保持默认选项，自动定义其他节点（图 3-46）。

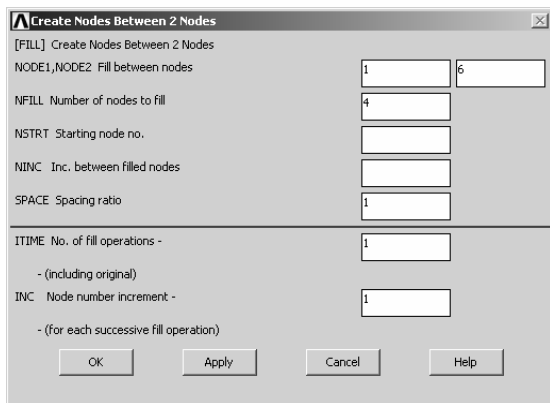


图 3-46 填充节点

最后复制节点。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Copy**→**Nodes**→**Copy**。单击打开“Copy nodes”复制节点对话框，“ITIME”复制总数后输入“6”，“INC”输入“6”，“DY”Y 方向相对位移输入“1E-2”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮确认操作（图 3-47）。

2. 命令流操作

```

/PREP7
ET,1,PLANE13          ! 定义单元
EMUNIT,MKS             ! 设定单位系统
MP,MURX,1,1            ! 设定空气相对磁导率
MP,MURX,2,1E5          ! 设定铁的相对磁导率

```

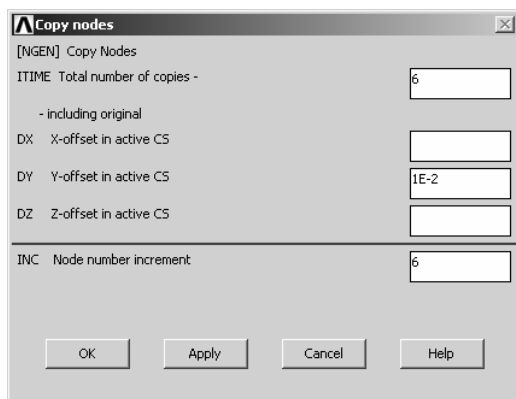


图 3-47 复制节点对话框

MP,MURX,3,5.30504 ! 设定永磁铁的相对磁导率
 MP,MGXX,3,149990.0 ! 永磁铁的矫顽力
 N,1
 N,6,5E-2
 FILL
 NGEN,6,6,1,6,1E-2,,1E-2

命令流操作说明:

当模型中有不同模型参数, 如材料类型时, 采用赋予参数编号的方式来定义, 如 MP,MURX,1,1, MP,MURX,2,1E5 定义两种材料的相对磁导率, 则分别编号为 1 和 2。

3.2.3 节点选取

为了对有限元模型进行某些操作, 如施加负载和边界条件, 常常需要选择某些节点, 为此, 节点操作是一个经常会用到的操作。

命令操作:

NSEL, Type, Item, Comp, VMIN, VMAX, VINC, KABS

Type: 设定选择节点类型。

S: 选择新组 (默认)。

R: 当前组中再选择。

A: 附加选择一组扩充当前组。

U: 从当前组中删除。

ALL: 选择全部。

NONE: 全部删除选择。

INVE: 翻转当前选择, 即选择的变成非选择的。

Item: 当前选择组标签, 如 LOC 表示位置。

Comp: Item 的组成部分, 如 Item 是 LOC, 则 Comp 可以是 X,Z 表示 X,Y,Z 坐标。

VMIN,VMAX,VINC: 选择范围, 分别表示最小、最大和增量。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Circuit→Delete Elements

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Pre-tens Elemnts

Main Menu→Solution→Manual Rezoning→Create Remesh Zone(s)→Select Nodes to Maintain

Utility Menu→Select→Entities (图 3-48)

3.3 单元操作

建立有限元模型很重要的一步就是对其单元的操作。为了快速建立有限元模型,用户可以采用复制单元操作。为了检查建立的有限元模型,还可以显示单元编号以更详细的了解自己建立的有限元模型。

3.3.1 单元复制

单元复制是快速建立有限元模型的有效方法之一。

命令操作:

EGEN, ITIME, NINC, IEL1, IEL2, IEINC, MINC, TINC, RINC, CINC, SINC, DX, DY, DZ

ITIME: 复制次数, 包括自己本身。

NINC: 复制单元时, 相应的节点号码的增加量。

IEL1, IEL2, IEINC: 要复制的单元。如果 IEL1 为负, IEL2 和 IEINC 都忽略, 最后 IEL1 个单元被用作复制的形式。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Elements→Auto Numbered (图 3-49)



图 3-48 节点选取

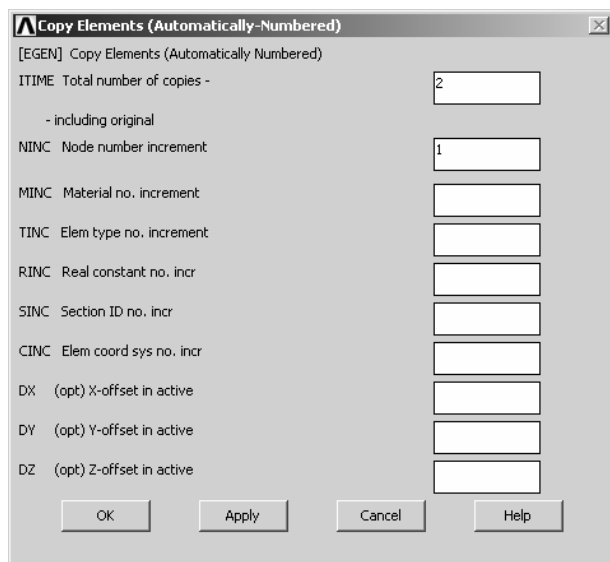


图 3-49 单元复制

3.3.2 显示编号

ANSYS 可以在有限元模型中显示编号，以检查所建立模块的对象（节点、单元等）。

命令操作：

```
/PNUM, Label, KEY
```

Label: 要显示的对象名称。

KEY: 显示编号（1）或者不显示编号（0）。

3.3.3 单元属性

当有限元模型出现两种或者两种以上单元属性时，采用编号的方式来区分不同属性。第 2 章已经介绍过模型参数的设定及编号（在 ET, MP 和 R 命令及其对应菜单操作中设定），这里介绍将这些参数赋予模型的方法。

1. 选择单元

命令操作：

```
TYPE, ITYPE
```

ITYPE: 单元编号（默认为 1），此编号即建立单元时用户赋予的编号。

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attrbs

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes（图 3-50）

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Elem Ext Opts

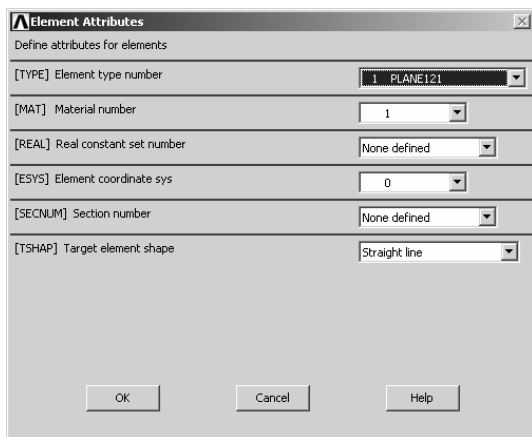


图 3-50 选择单元

2. 选择实常数

命令操作：

```
REAL, NSET
```

NSET: 此命令之后定义的单元将会有此实常数编号。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes (图 3-50)

3. 选择材料

命令操作:

MAT, MAT

MAT: 此命令之后定义的单元将会有此材料编号。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes (图 3-50)

3.4 负载定义

电场和磁场的负载定义方法和第 2 章讲述的基本方法没有太大区别, 所使用的命令仍然为 D, F 等, 但是其意义有了本质的变化。因为磁场和电场负载有区别, 这里分别讲述磁场和电场负载的定义方法。

3.4.1 磁场负载

1. 矢量磁位

二维磁场分析采用矢量磁位 (AZ) 来定义边界条件, 如图 3-51 所示, 这里重点介绍二维磁场的边界条件的定义。矢量磁位可以定义磁力线平行、远场、周期边界条件和外部强加磁场 (表 3-2)。

表 3-2 磁场边界条件

Boundary Condition	Value of AZ
磁力线垂直	不需要 (自然满足)
磁力线平行	设定 $AZ = 0$, 使用 D 命令 (Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Boundary→Vector Poten or Flux Par'l→On Lines 或 On Nodes) (图 3-51)
远场	使用 INFIN9 单元或 INFIN110 单元

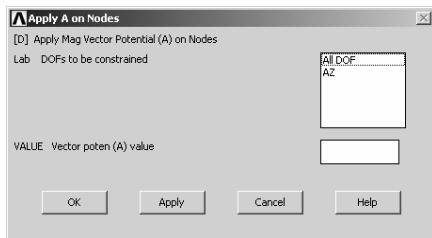


图 3-51 矢量磁位

2. 耦合自由度

有时在分析完成之前，某些自由度约束的具体值并不知道，仅知道某组节点的此类自由度约束相同。耦合自由度使其中一个成员的计算结果成为其整个一组的值。

命令操作：

CP, NSET, Lab

NSET: 分组编号。

Lab: 耦合节点的自由度约束对象。

NODE1, NODE2, NODE3, ..., NODE17: 要定义耦合自由度的节点。

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Coupling/Ceqn→Couple DOFs (图 3-52)

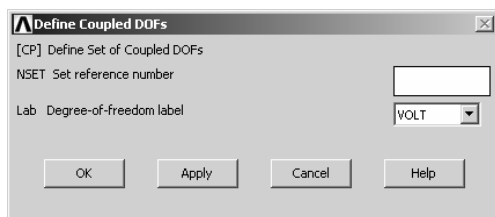


图 3-52 设定耦合自由度

3.4.2 电场负载

1. 电流

电流 (AMPS) 是节点上的集中力，用户通常在模型边界设定。正值表示电流流入节点。对于均匀电流密度分布，在电压 (VOLT) 自由度内耦合适当节点，然后施加电流在其中的一个节点上。

命令操作：

F, NODE, Lab, VALUE, VALUE2, NEND, NINC

菜单操作：

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Excitation→Current (图 3-53)

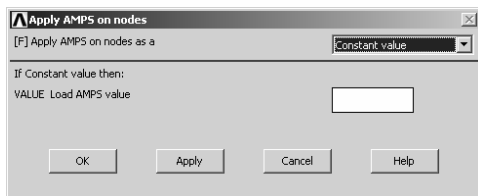


图 3-53 施加电流

2. 电压

用户通常在模型边界施加已知电压，所以，电压是一种自由度 (DOF) 约束。典型的

方法是在一端施加零电压（地端），然后在另一端施加已知电压。

命令操作：

D, NODE, Lab, VALUE, VALUE2, NEND, NINC, Lab2, Lab3, Lab4, Lab5, Lab6

菜单操作：

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage（图 3-54）

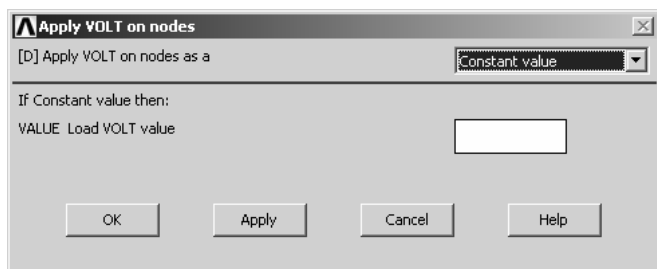


图 3-54 施加电压

实例 3-3 建立二维平行板电容的单元，设定负载

条件同实例 3-1，此例中在上极板施加电压 $U = 5\text{V}$ ，下极板施加 $U = 0\text{V}$ （图 3-55）。

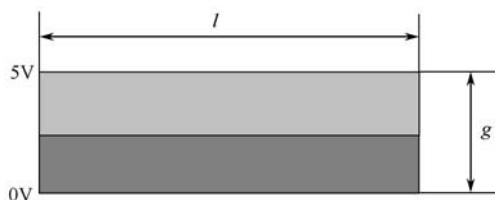
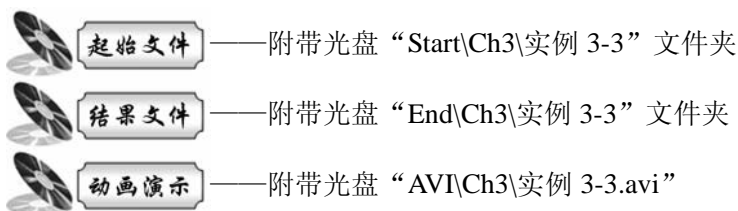


图 3-55 简单二维平行板电容



1. GUI 操作

(1) 建立单元

选择材料 2。操作路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes（图 3-56）。

然后建立单元。连接节点 1,2,6,5 形成一个单元。操作路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes，拾取节点 1,2,6,5 形成单元。

然后将这个建立的单元复制三次，形成相对介电常数为 2 的介质的单元。操作路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Elements→Auto Numbered，选择刚建立的单元，复制单元（图 3-57）。

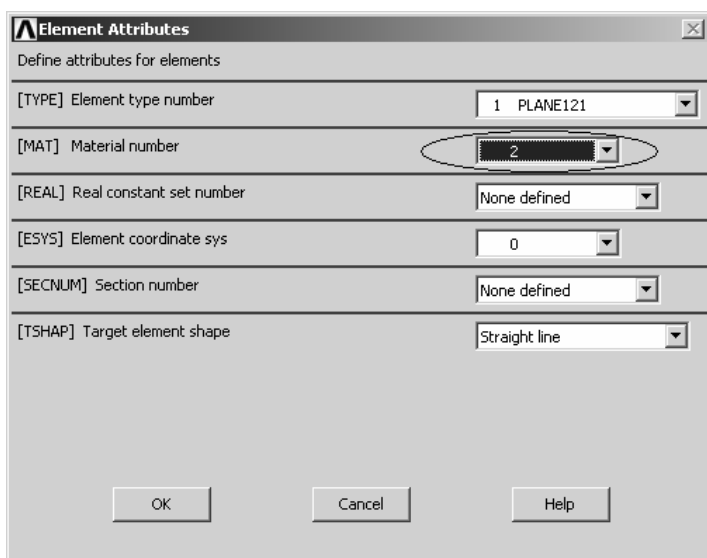


图 3-56 选择材料 2

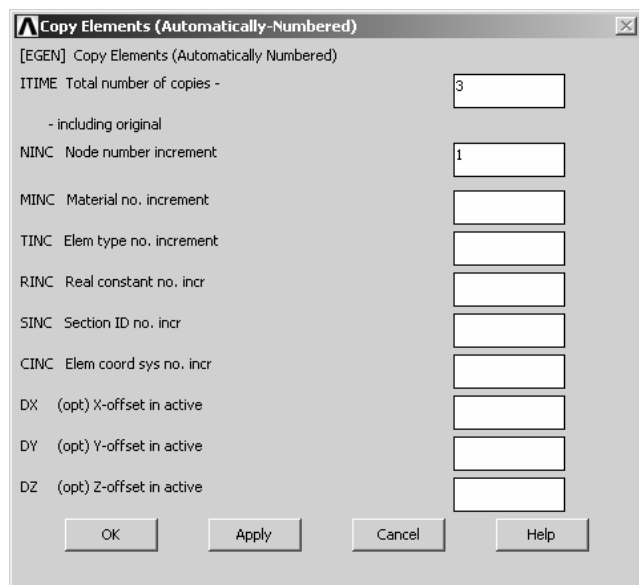


图 3-57 复制单元

采用类似方法，建立介电常数为 1 的介质的单元。选定材料 1，连接节点 5,6,10,9 形成单元，然后复制此单元。

(2) 设定负载

首先，选择下极板。菜单路径 **Utility Menu**→**Select**→**Entities**。选择 “By Location”，“Y coordinates”，“Min, Max” 框中输入 “0”，其他保持默认，单击 “OK” 按钮确认（图 3-58）。

然后，选择路径 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Electric**→**Boundary**→**Voltage**（图 3-59）。电压值输入 “0”（图 3-60）。

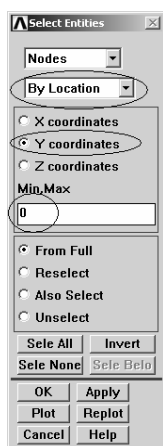


图 3-58 选择 Y=0 处的节点

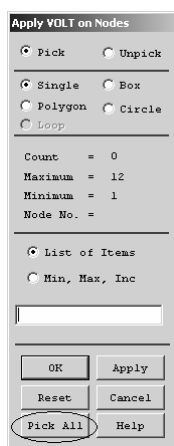


图 3-59 拾取所有节点



图 3-60 设定电压为 0V

用类似方法，选择上极板（图 3-61），施加电压为 5V（图 3-62）。最后，选择所有节点（图 3-63）。单击“Cancel”按钮退出。

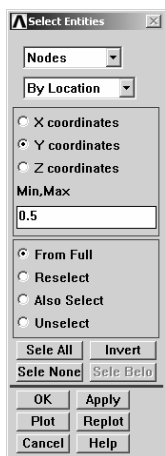


图 3-61 选择 Y=0.5 处的节点

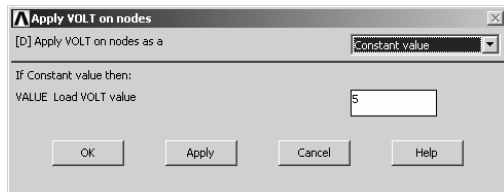


图 3-62 设定电压为 5V



图 3-63 选择所有节点



必须单击“Cancel”按钮退出，若单击“OK”按钮或者“Apply”按钮，则会只选择部分节点，如这里只选择 Y=0 的节点。

此时模型如图 3-64 所示。



图 3-64 建立好的模型

2. 命令流操作

(接实例 3-1)

```

MAT,2                                ! 选择材料 2
E,1,2,6,5                            ! 建立单元
EGEN,3,1,-1                          ! 复制单元
MAT,1                                ! 选择材料 1
E,5,6,10,9
EGEN,3,1,-1
NSEL,S,LOC,Y,0                       ! 选择下极板
D,ALL,VOLT,0                         ! 施加电压  $U = 0V$ 
NSEL,S,LOC,Y,0.5                     ! 选择上极板
D,ALL,VOLT,5                         ! 施加电压  $U = 5V$ 
NSEL,ALL                             ! 选择所有节点
FINISH

```

命令流操作说明：

在定义完 **NSEL** 选择的节点的性质后，通常只有部分节点被选定，此时如果不用 **NSEL,ALL** 操作选择所有节点，那么程序不会自动选择所有节点，这会使以后程序运行出错。

实例 3-4 建立永磁铁回路的单元，设定负载

条件同实例 3-2，此例中为磁路设定负载（图 3-65）。

因为假定没有漏磁，所以磁力线沿着铁心。永磁铁和空气间隙形成一个闭合回路。磁力线必须沿着器件的边界，所以，磁力线平行（ $A = 0$ ）边界条件设定在模型的外部节点上。内部结点耦合以使内部边界形成磁力线平行边界条件。

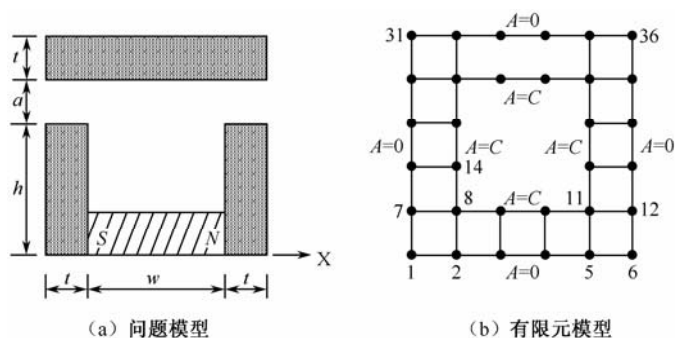
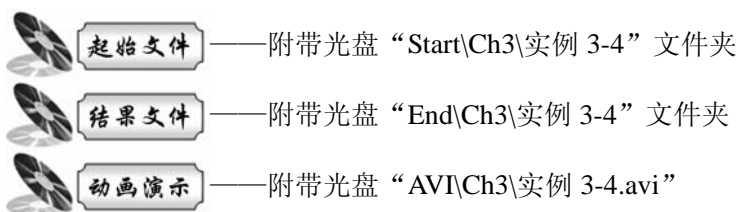


图 3-65 永磁铁回路



1. GUI 操作

(1) 建立单元

首先，选择材料 3 即永磁铁。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes (图 3-66)。

后连接节点 2,3,9,8 建立单元。操作路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes，拾取节点 2,3,9,8 形成单元。

然后，选择此单元，将这个单元复制 3 次，形成永磁铁的单元。操作路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Elements→Auto Numbered，选择刚建立的单元，复制单元 (图 3-67)。

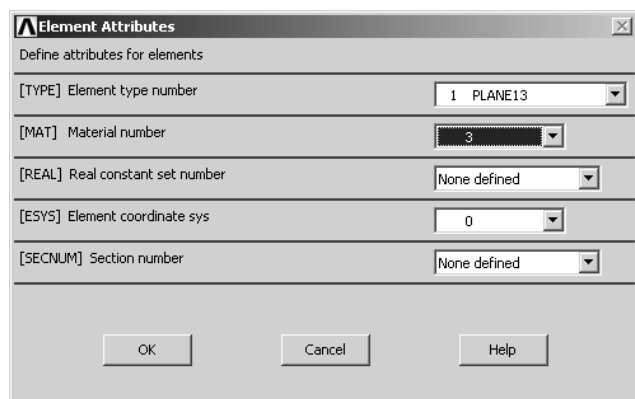


图 3-66 选择材料 3

然后选择单元 2，即铁 (图 3-68)，连接节点 1,2,8,7 建立单元，复制此单元 3 次建立铁心单元一部分，其中节点编号增量填“6” (图 3-69)。

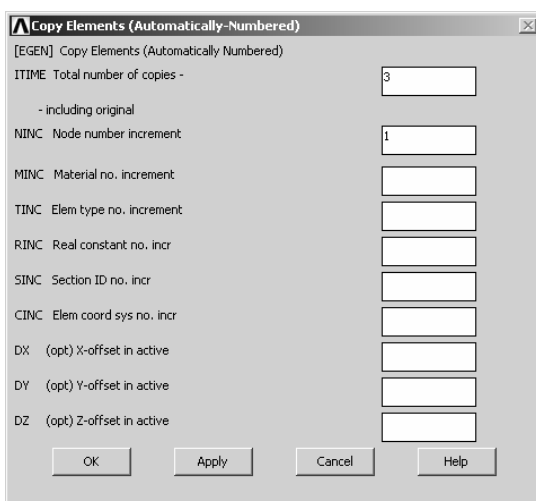


图 3-67 复制单元

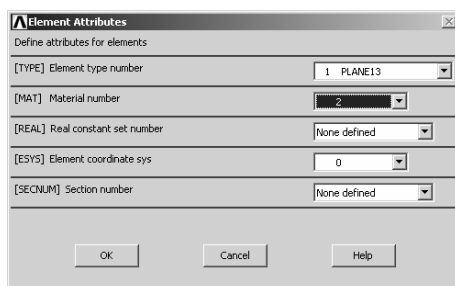


图 3-68 选择材料 2

同样方法，选择节点 5,6,12,11 建立单元，复制此单元 3 次，其中节点编号增量也为 6。类似的，选择节点 25,26,32,31 建立单元，复制此单元 5 次，其中节点编号增量为 1。

然后类似方法建立空气单元，选择材料 1，分别连接节点 19,20,26,25 和 23,24,30,29 建立单元。

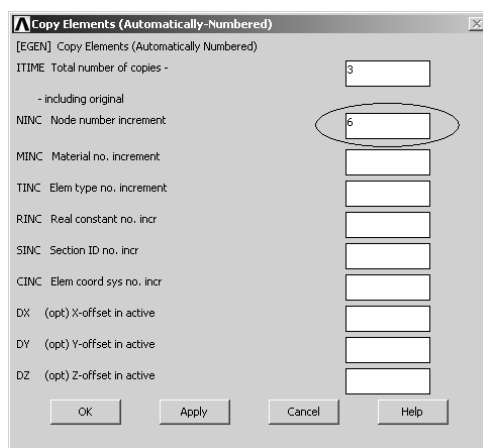


图 3-69 复制单元 3 次

(2) 施加负载

首先选择外部节点，设定磁力线平行边界条件。

选择 $X=0$ 处节点。菜单路径 **Utility Menu**→**Select**→**Entities**。选择“By Location”，“X coordinates”，“Min,Max”框中输入“0”，其他保持默认，单击“Apply”按钮确认（图 3-70）。

单击“Apply”按钮则当前对话框不会关闭，单击“OK”按钮关闭当前对话框，所以为了操作方便，如果还要用当前对话框进行下一步操作，请读者习惯使用“Apply”按钮来确认当前操作。

附加选择 $X=5E-2$ 处节点，注意选择“Also Select”选项（图 3-71）。



图 3-70 选择 $X=0$ 处节点

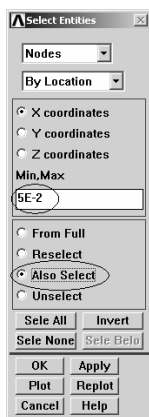


图 3-71 选择 $X=5E-2$ 处节点

继续附加选择 $Y=0$ 和 $Y=5E-2$ 处的节点，最后单击“OK”按钮确认。

然后在所有选择节点上施加磁力线平行边界条件，选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Loads**→**Define Loads**→**Apply**→**Magnetic**→**Boundary**→**Vector Poten**→**On Nodes**。单击“Pick All”按钮选择所有节点（图 3-72），在“Apply A on Nodes”对话框中选择“AZ”，单击“OK”按钮确认（图 3-73）。

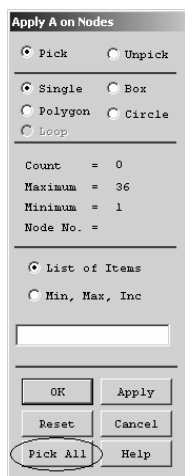


图 3-72 选择所有节点

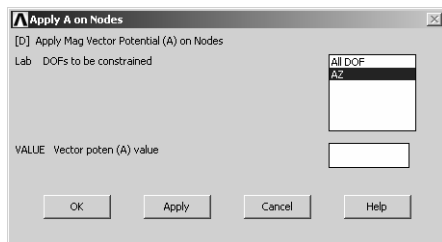


图 3-73 施加矢量磁位

再次选择所有节点（图 3-74），注意：单击“Cancel”按钮关闭对话框。

最后耦合内部节点。选择路径 Main Menu → Preprocessor → Coupling/Ceqn → Couple DOFs。选择节点 8,9,10,11,14,17,20,23,26,27,28,29，设定“NSET”编号为“1”，“Lab”为“AZ”（图 3-75）。

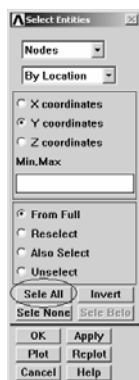


图 3-74 选择所有节点

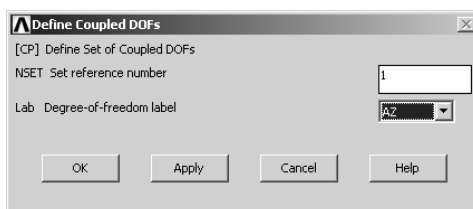


图 3-75 耦合内部节点

建立好的模型如图 3-76 所示。

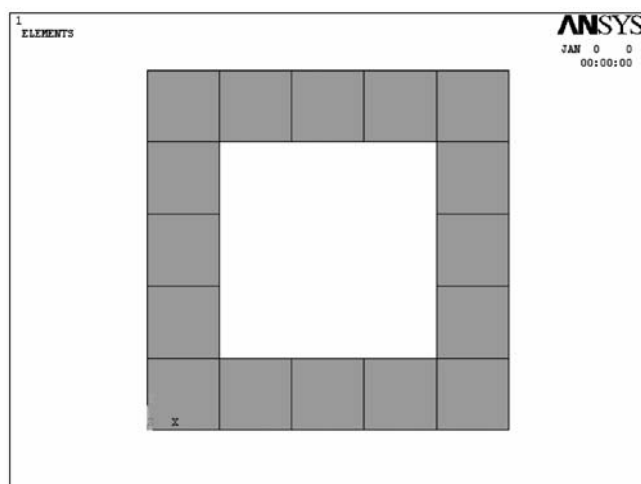


图 3-76 建立好的模型

2. 命令流操作

（接实例 3-2）

```

MAT,3                                ! 永磁铁
E,2,3,9,8
EGEN,3,1,-1
MAT,2                                ! 铁
E,1,2,8,7
EGEN,3,6,-1
E,5,6,12,11

```

```

EGEN,3,6,-1
E,25,26,32,31
EGEN,5,1,-1
MAT,1                                ! 空气
E,19,20,26,25
E,23,24,30,29
NSEL,S,LOC,X,0                       ! 选择外部节点
NSEL,A,LOC,X,5E-2
NSEL,A,LOC,Y,0
NSEL,A,LOC,Y,5E-2
D,ALL,AZ,0                           ! 设定磁力线平行边界条件
NSEL,ALL
CP,1,AZ,8,9,10,11,14                ! 耦合内部节点
CP,1,AZ,17,20,23,26
CP,1,AZ,27,28,29
FINISH

```

3.5 求解和后处理器

建立好有限元模型并施加完负载后，下一步就是求解了。然后为了查看并分析结果，用户还可以在后处理器中查看分析结果。

3.5.1 电场和磁场求解

1. 电场求解

电场求解方法同第 2 章介绍方法，使用 SOLVE 命令或其对应的 GUI 路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 操作来求解。

2. 磁场求解

非线性磁场求解不同于前面介绍的方法。

命令操作：

MAGSOLV

菜单操作：

Main Menu→Solution→Solve→Electromagnet→Static Analysis→Opt & Solv (图 3-77)

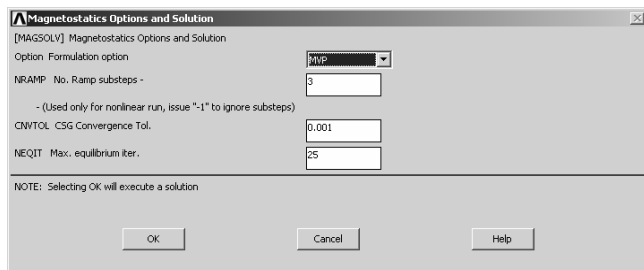


图 3-77 非线性磁场求解

3.5.2 后处理器

1. 绘制磁力线

磁力线是 AZ 常数的线。二维磁场分析中，显示磁力线的方法如下所述。

命令操作：

PLF2D

菜单操作：

Utility Menu→Plot→Results→Flux Lines（图 3-78）

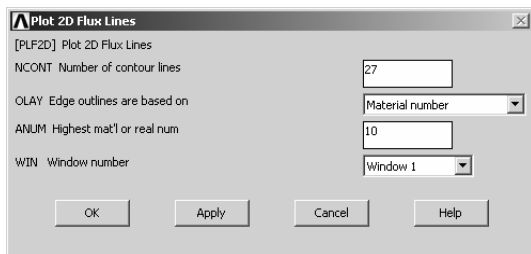


图 3-78 绘制磁力线

2. 轮廓线

用户可以绘制几乎任意项目的轮廓线（磁力线密度、场强和电流密度等）。

以连续轮廓线方式显示如下所述。

命令操作：

PLNSOL, Item, Comp, KUND, Fact, FileID

Item: 绘制的对象，如 EF,D,H,B。

Comp: 绘制对象包含的项目，如以上 EF,D,H,B 的 X,Y,Z,SUM。

菜单操作：

Utility Menu→Plot→Results→Contour Plot→Nodal Solution（图 3-79）

以非连续轮廓线方式显示如下所述。

命令操作：

PLESOL, Item, Comp, KUND, Fact

Item: 绘制的对象，如 EF,D,H,B。

Comp: 绘制对象包含的项目，如以上 EF,D,H,B 的 X,Y,Z,SUM。

菜单操作：

Utility Menu→Plot→Results→Contour Plot→Elem Solution（图 3-80）

3. 矢量图

矢量图提供一种有效的方法使用户查看矢量对象，如 E,D,B,H 等。

命令操作：

PLVECT, Item, Lab2, Lab3, LabP, Mode, Loc, Edge, KUND

Item, Lab2, Lab3: 绘制对象的 i, j, k 分量。

菜单操作:

Utility Menu→Plot→Results→Vector Plot (图 3-81)

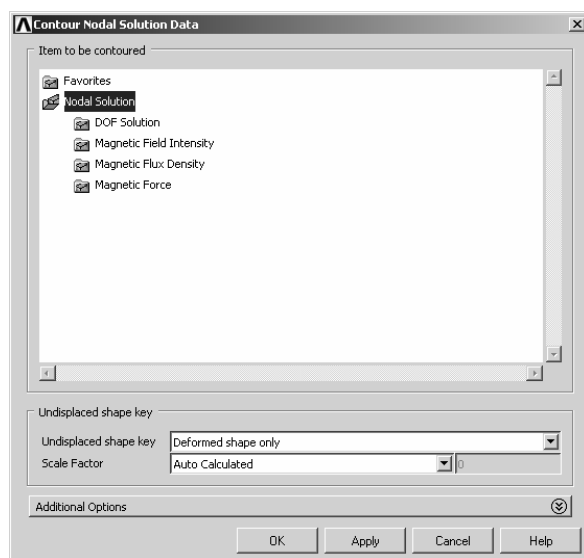


图 3-79 以连续轮廓线方式显示

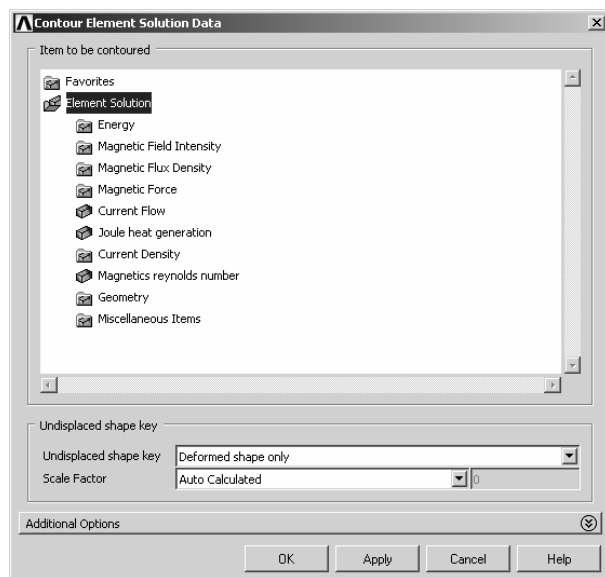


图 3-80 以非连续轮廓线方式显示

4. 列出结果数据

列出结果数据的命令格式与前面所述的绘制命令格式相似，只是把命令的前面两个字母 PL（代表英文 PLOT）替换为 PR（代表英文 PRINT），所以这里只做简单介绍。

命令操作:

PRNSOL, PRESOL, PRVECT

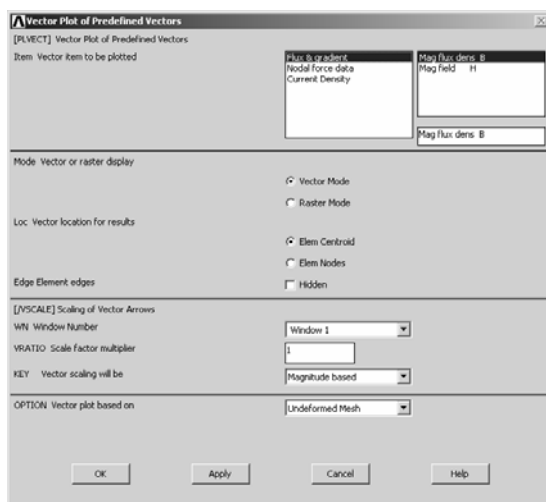


图 3-81 绘制矢量图

菜单操作:

Utility Menu→List→Results→Nodal Solution (图 3-82)

Utility Menu→List→Results→Element Solution (图 3-83)

Utility Menu→List→Results→Vector Data (图 3-84)

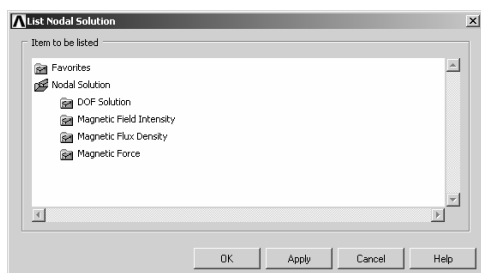


图 3-82 列出节点数据

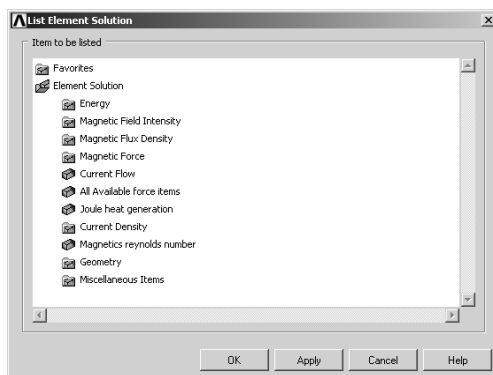


图 3-83 列出单元数据

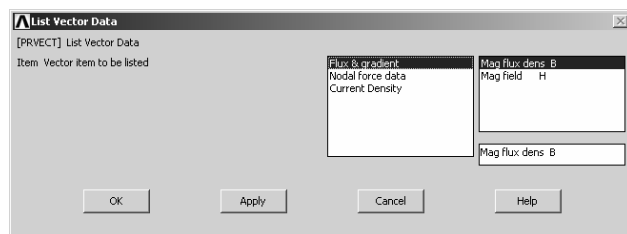


图 3-84 列出矢量数据

实例 3-5 二维平行板电容的求解，查看结果

条件同实例 3-1，此例中求解并查看结果（图 3-85）。

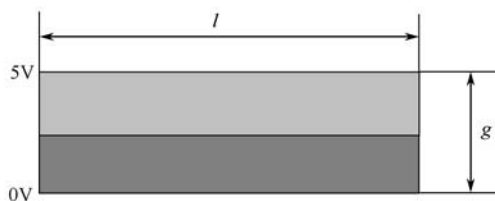


图 3-85 简单二维平行板电容



起始文件

——附带光盘 “Start\Ch3\实例 3-5” 文件夹



结果文件

——附带光盘 “End\Ch3\实例 3-5” 文件夹



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch3\实例 3-5.avi”

1. GUI 操作

(1) 求解

选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，求解当前模型。

(2) 绘制电场强度的轮廓线

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Contour Plot→Nodal Solution，在打开的对话框中选择路径 Nodal Solution→Electric Field→Electric field vector sum（图 3-86）。绘制电场强度的轮廓线如图 3-87 所示。

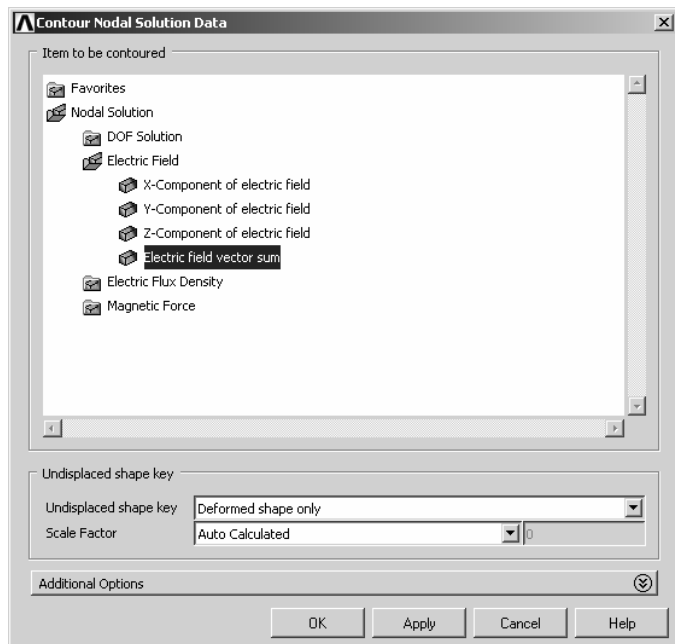


图 3-86 绘制电场强度的轮廓线

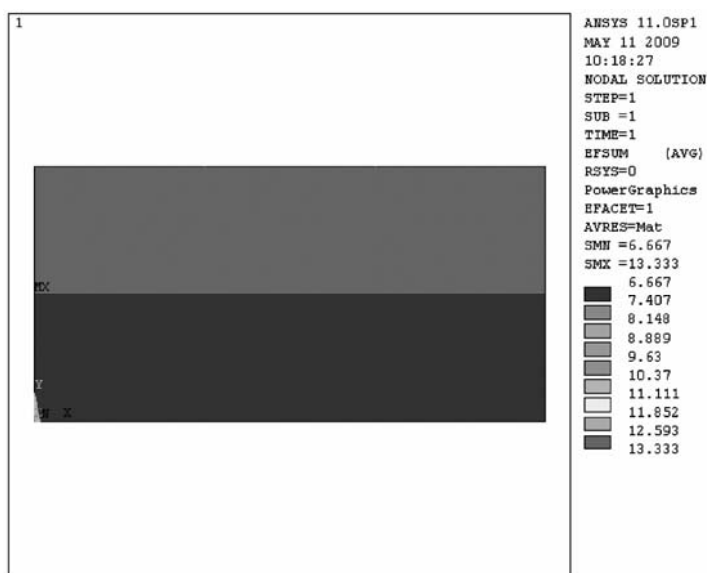


图 3-87 电场强度的轮廓线图

(3) 绘制电位移矢量轮廓线

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Contour Plot→Nodal Solution，在打开的对话框中选择路径 Nodal Solution→Electric Flux Density→Electric flux density vector sum。绘制电场强度的轮廓线如图 3-88 所示。

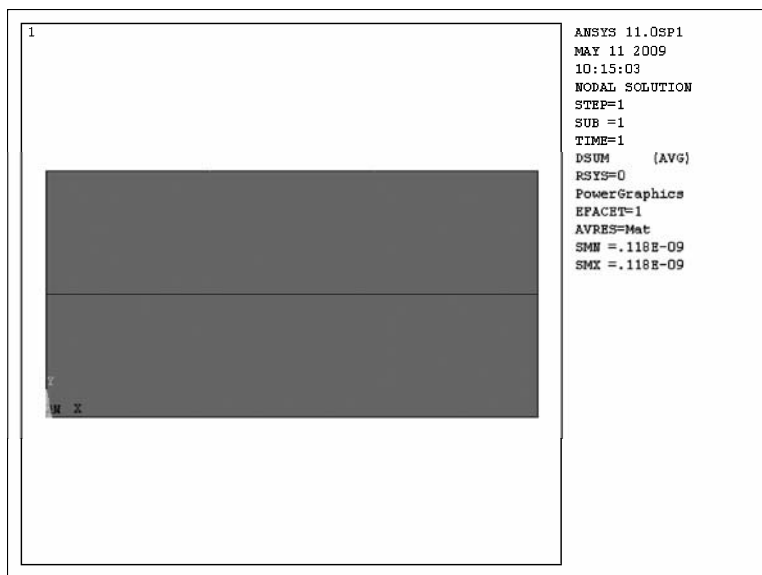


图 3-88 绘制电位移矢量轮廓线

(4) 绘制电场强度的矢量图

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Vector Plot (图 3-89)，绘制的电场强度的矢量图如图 3-90 所示。

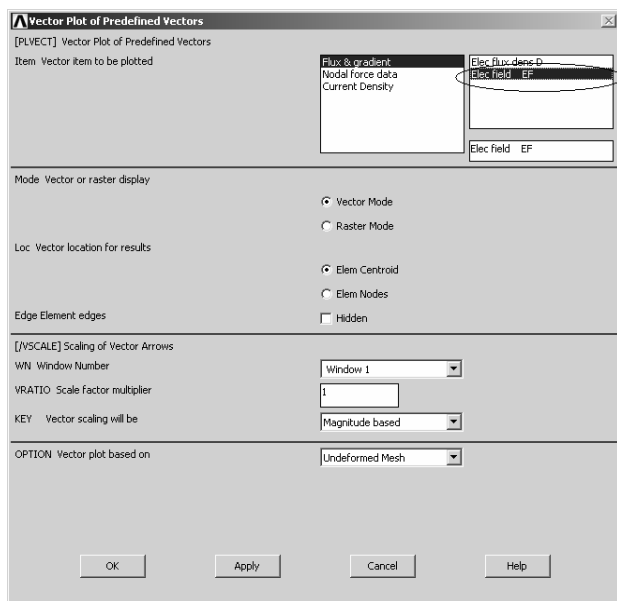


图 3-89 绘制电场强度的矢量图

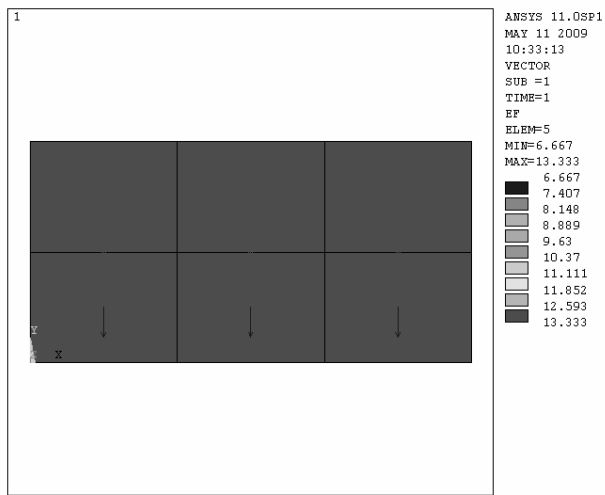


图 3-90 电场强度的矢量图

(5) 绘制电位移矢量的矢量图

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Vector Plot，绘制的电位移矢量的矢量图如图 3-91 所示。

2. 命令流操作

(接实例 3-3)

```
/SOLU
SOLVE
FINISH
```

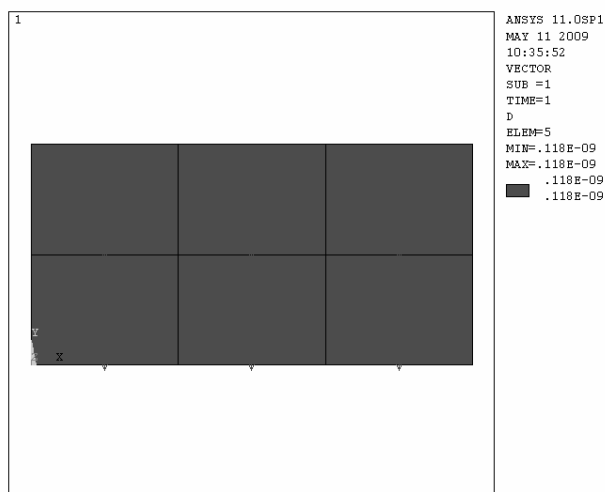


图 3-91 电位移矢量的矢量图

```
/POST1
```

```
PLNSOL,EF,SUM
```

! 绘制分析结果图形

```
PLNSOL,D,SUM
```

```
PLVECT,EF
```

```
PLVECT,D
```

```
FINISH
```

实例 3-6 永磁铁回路的求解, 查看结果

条件同实例 3-2, 此例求解和查看结果 (图 3-92)。

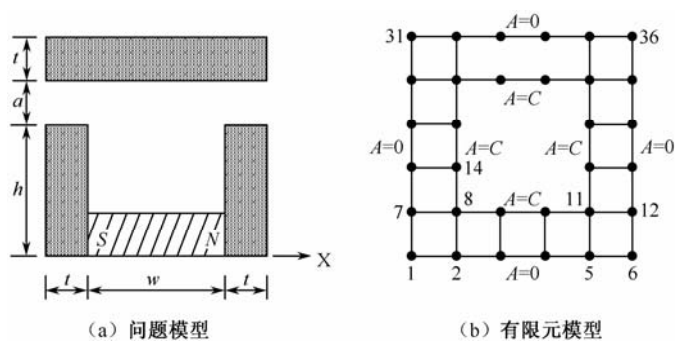


图 3-92 永磁铁回路



起始文件

——附带光盘 “Start\Ch3\实例 3-6” 文件夹

结果文件

——附带光盘 “End\Ch3\实例 3-6” 文件夹

动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch3\实例 3-6.avi”

1. GUI 操作

(1) 求解磁场

选择路径 **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**Electromagnet**→**Static Analysis**→**Opt&Solv** (图 3-93)。

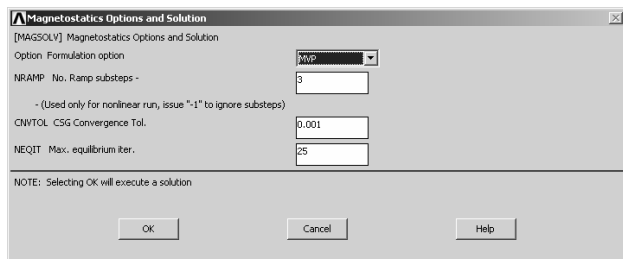


图 3-93 求解磁场

(2) 绘制磁力线图

选择路径 **Utility Menu**→**Plot**→**Results**→**Flux Lines** (图 3-94)。绘制结果如图 3-95 所示。

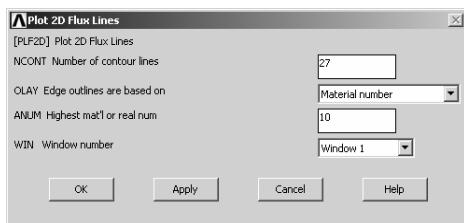


图 3-94 绘制磁力线

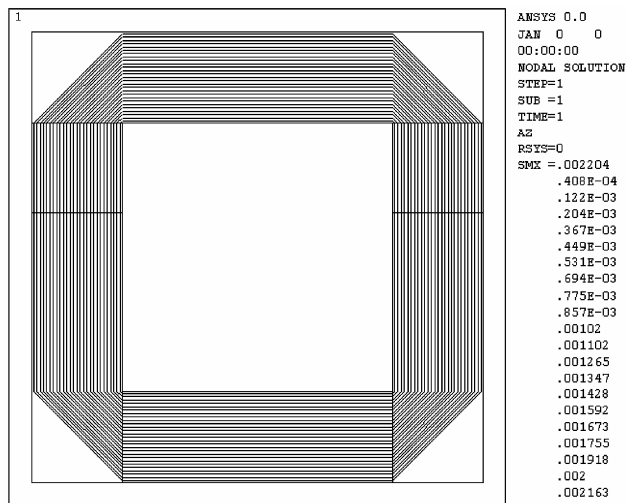


图 3-95 磁力线图

(3) 绘制磁感应强度轮廓线

选择路径 **Utility Menu**→**Plot**→**Results**→**Contour Plot**→**Nodal Solution** (图 3-96)。绘制结果如图 3-97 所示。

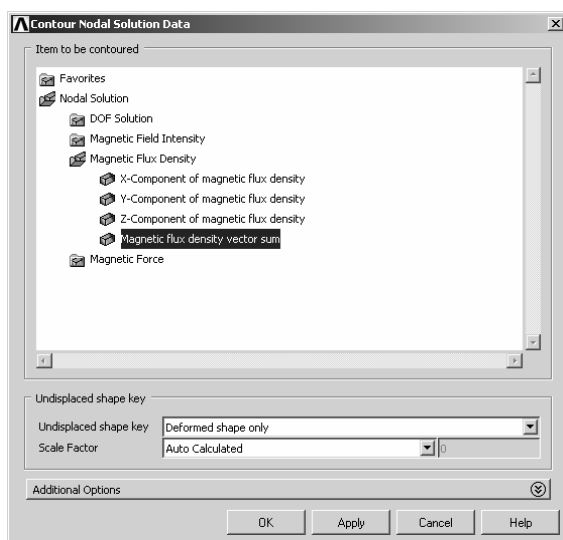


图 3-96 绘制磁感应强度轮廓线

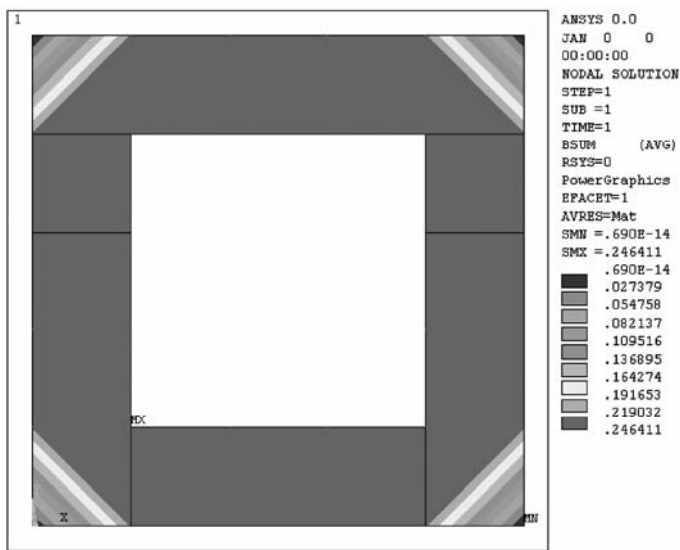


图 3-97 磁感应强度轮廓线

(4) 绘制磁场强度轮廓线

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Contour Plot→Nodal Solution。绘制结果如图 3-98 所示。

(5) 绘制磁感应强度矢量图

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Vector Plot (图 3-99)，绘制的磁感应强度的矢量图如图 3-100 所示。

(6) 绘制磁场强度矢量图

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Vector Plot，绘制的磁场强度的矢量图如图 3-101 所示。

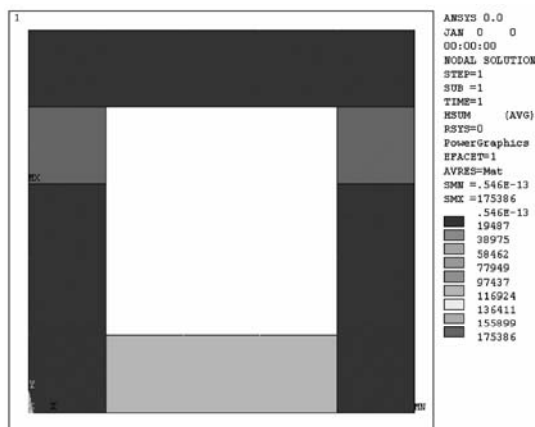


图 3-98 磁场强度轮廓线

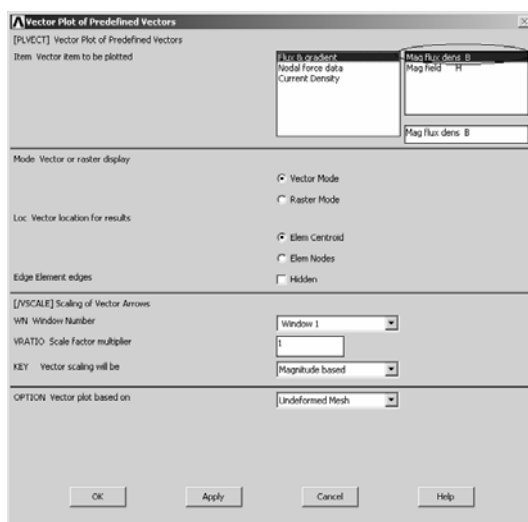


图 3-99 绘制磁感应强度矢量图

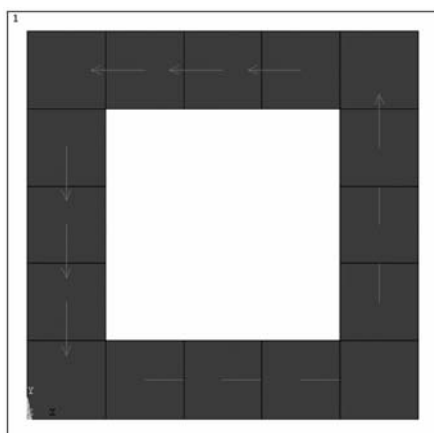


图 3-100 磁感应强度矢量图

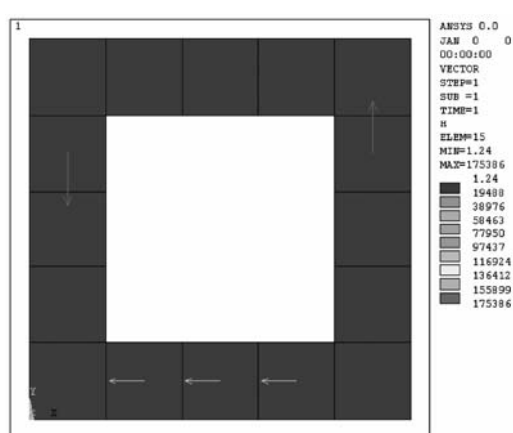


图 3-101 磁场强度矢量图

2. 命令流操作

(接实例 3-4)

```

/SOLU
MAGSOLV          ! 磁场求解
FINISH
/POST1
PLF2D            ! 绘制分析结果图形
PLNSOL,B,SUM
PLNSOL,H,SUM
PLVECT,B
PLVECT,H
FINISH

```

3.6 综合实例

实例 3-7 二维平行板电容

建立一个二维平行板电容器 (图 3-102), 其长度为 $l=1\text{m}$, 两极板之间的距离为 $g=0.5\text{m}$, 电介质左半部为空气, 右半部为相对介电常数为 2 的电介质, 电压为 $U=5\text{V}$, 求空气中的电场强度 E 。

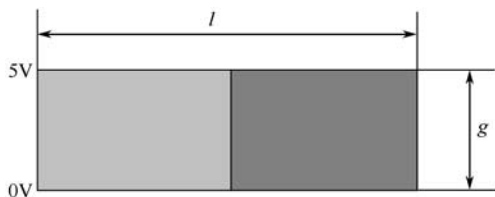


图 3-102 简单二维平行板电容



结果文件

——附带光盘 “Ch3\实例 3-7” 文件夹



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch3\实例 3-7.avi”

1. GUI 操作

(1) 设定图形界面的使用偏好

操作方法 Main Menu→Preferences, 弹出 “Preferences for GUI Filtering” 对话框, 选择 “Electric” (图 3-103), 这样可以过滤不需要的图形工作菜单, 简化后续操作。

(2) 定义模型参数

首先, 定义单元。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 出现 “Element Types” 单元类型对话框, 此处单击 “Add...” 按钮添加单元 (图 3-104)。

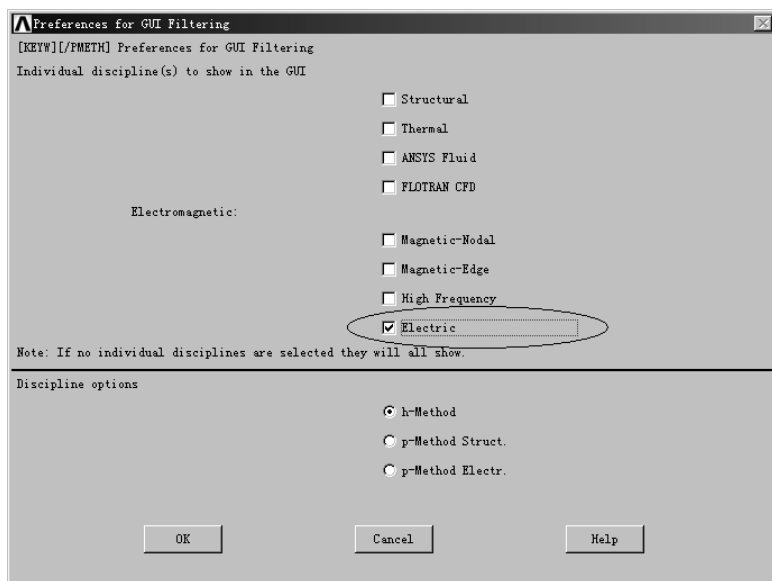


图 3-103 设定使用偏好

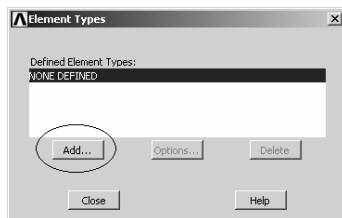


图 3-104 单击“Add...”按钮添加单元

弹出“Library of Element Types”单元类型库对话框，左侧选择栏中选择“Electrostatic”，右侧选择栏中选择“2D Quad 121”（图 3-105）。

单击“OK”按钮确认后，出现“Element Types”单元类型对话框，提示已定义 PLANE121（图 3-106）。单击“Close”按钮关闭。

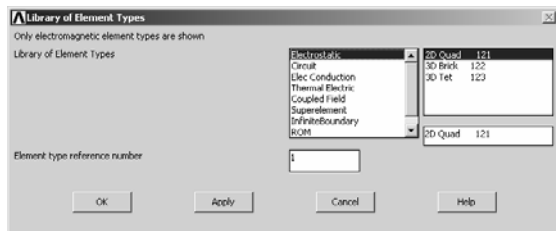


图 3-105 选择 PLANE121

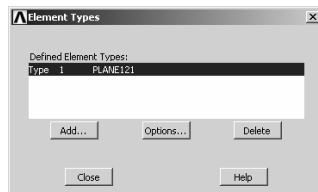


图 3-106 已定义 PLANE121

然后，定义材料属性，定义电介质的相对介电常数。

首先，定义材料 1 的相对介电常数。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，单击后打开“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框（图 3-107）。

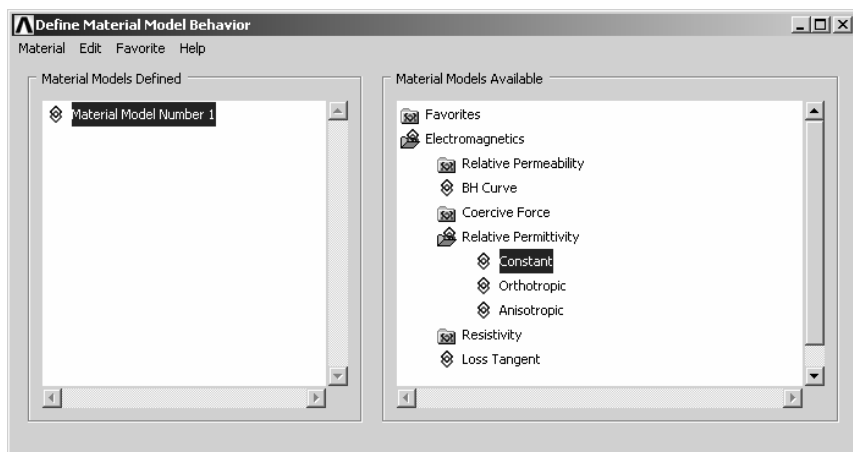


图 3-107 定义材料模型性质对话框

右边“Material Models Available”栏中选择“Electromagnetics→Relative Permittivity→Constant”，双击打开对话框定义材料 1 的相对介电常数（图 3-108）。

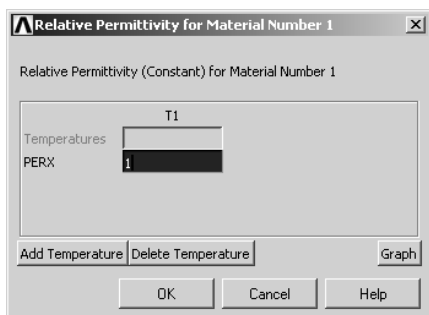


图 3-108 材料 1 的相对介电常数值

然后，定义材料 2 的相对介电常数。定义完材料 1 的相对介电常数后，在“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框选择“Material→New Model...”（图 3-109），单击打开“Define Material ID”定义材料 ID 对话框，输入“2”（图 3-110）。

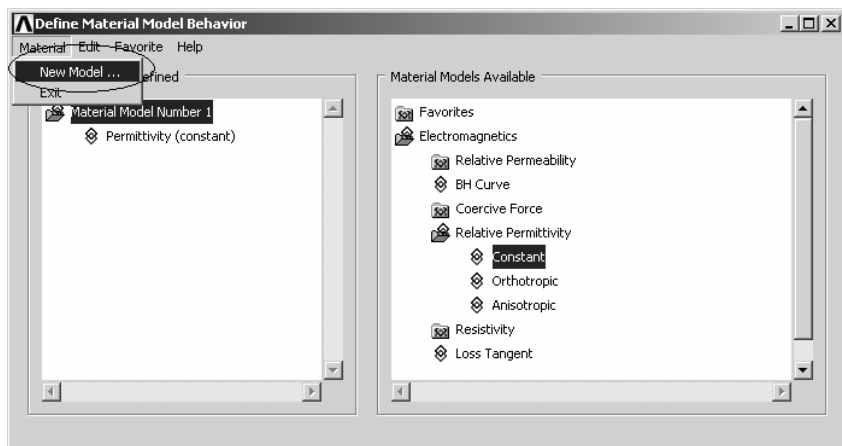


图 3-109 定义新材料

然后, 选择新定义的材料 2, 采用定义材料 1 的相对介电常数的方法, 定义材料 2 的相对介电常数 (图 3-111 和图 3-112)。关闭 “Define Material Model Behavior” 定义材料模型性质对话框, 完成定义。

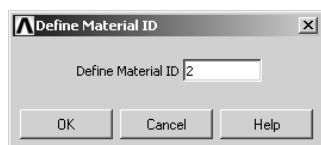


图 3-110 定义材料 ID 对话框

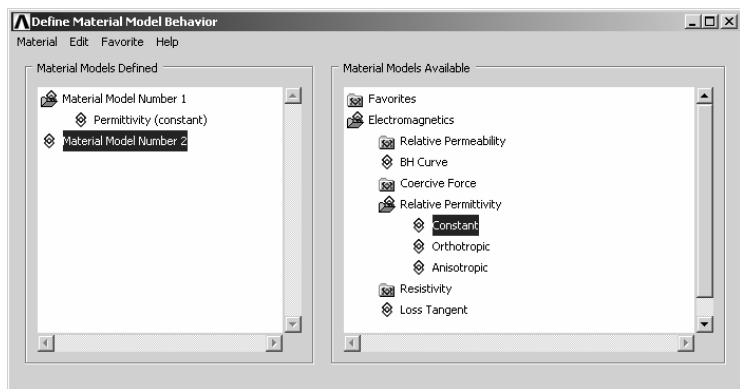


图 3-111 定义材料 2 的相对介电常数

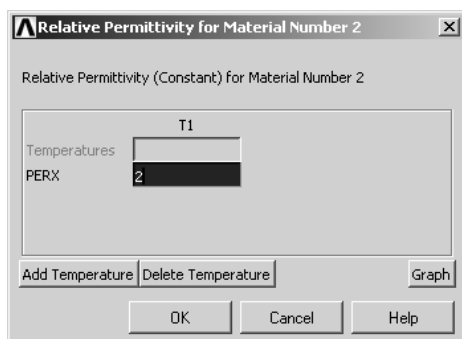


图 3-112 材料 2 的相对介电常数数值

(3) 建立节点

第一个节点位置为 0, 第三个节点位置为 1, 其他节点均匀填充其中。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Nodes**→**In Active CS**, 建立第一个节点 (图 3-113) 和第三个节点 (图 3-114)。

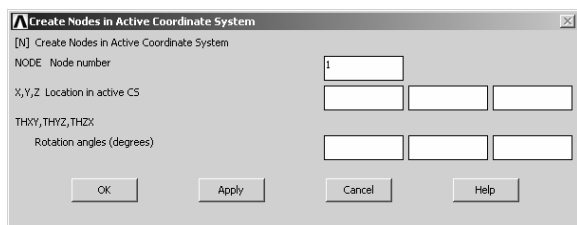


图 3-113 第一个节点

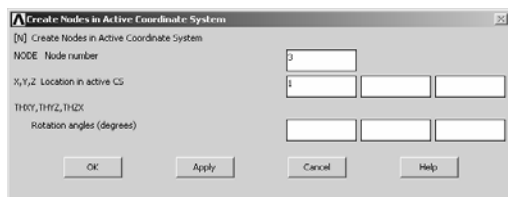


图 3-114 第三个节点

然后填充节点, 选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Nodes**→**Fill between Nds**, 填充节点, 拾取节点 1 和节点 3。单击 “OK” 按钮确认, 保持默认选项, 自动定义节点 (图 3-115)。

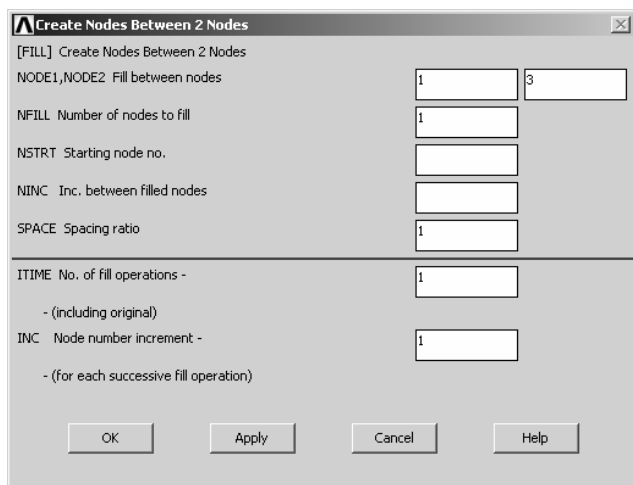


图 3-115 填充节点

然后，用同样方法在 $Y=0.5$ 处建立对应节点 4,5,6。

(4) 建立单元

首先，选择材料 1，操作路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes（图 3-116）。

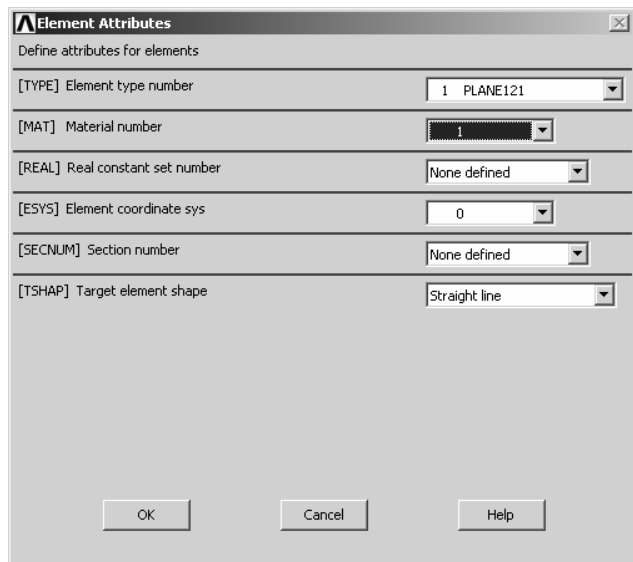


图 3-116 选择材料 1

操作路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes。连接节点 1,2,5,4 建立空气单元。

然后，同样方法选择材料 2，连接节点 2,3,6,5 建立电介质单元。

(5) 设定边界条件

首先，选择下极板。菜单路径 Utility Menu→Select→Entities。选择“By Location”，“Y coordinates”，“Min, Max”框中输入“0”，其他保持默认，单击“OK”按钮确认（图 3-117）。

然后，选择路径 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage，单击“Pick All”按钮（图 3-118），电压值输入“0”（图 3-119）。

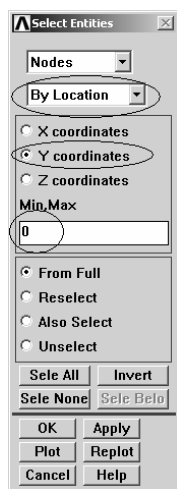


图 3-117 选择 Y=0 处的节点

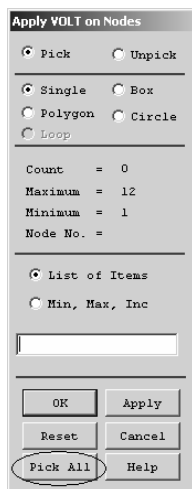


图 3-118 拾取所有节点

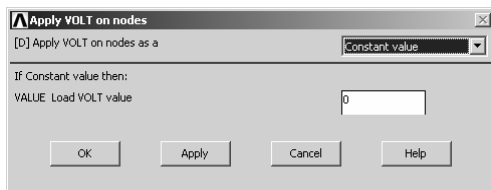


图 3-119 设定电压为 0V

然后，用类似方法，选择上极板，施加电压为 5V。
最后，选择所有节点（图 3-120）。单击“Cancel”按钮退出。
此时模型如图 3-121 所示。

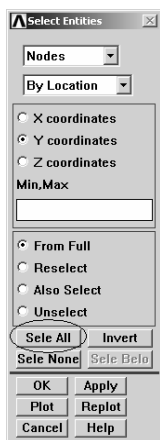


图 3-120 选择所有节点

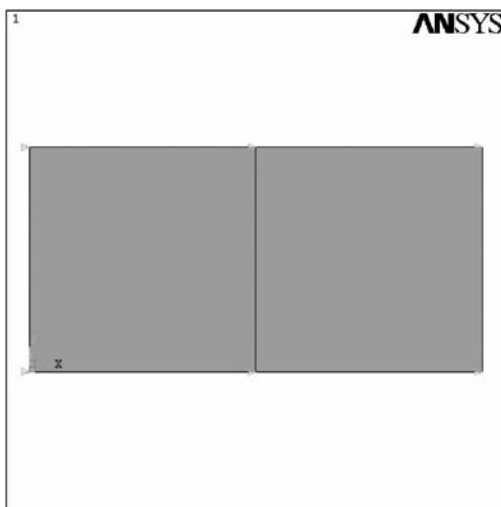


图 3-121 建立好的模型

(6) 求解

选择路径 **Main Menu**→**Solution**→**Solve**→**Current LS**，求解当前模型。

(7) 绘制电场强度的轮廓线

选择路径 **Utility Menu**→**Plot**→**Results**→**Contour Plot**→**Nodal Solution**，在打开的对话框中选择路径 **Nodal Solution**→**Electric Field**→**Electric field vector sum**（图 3-122）。绘制电场强度的轮廓线如图 3-123 所示。

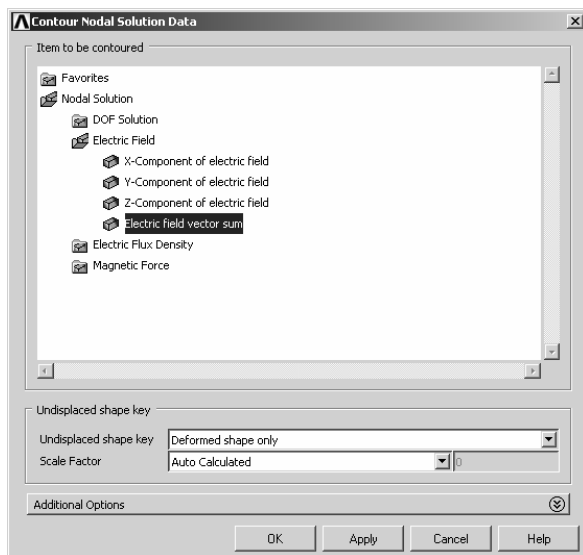


图 3-122 绘制电场强度的轮廓线

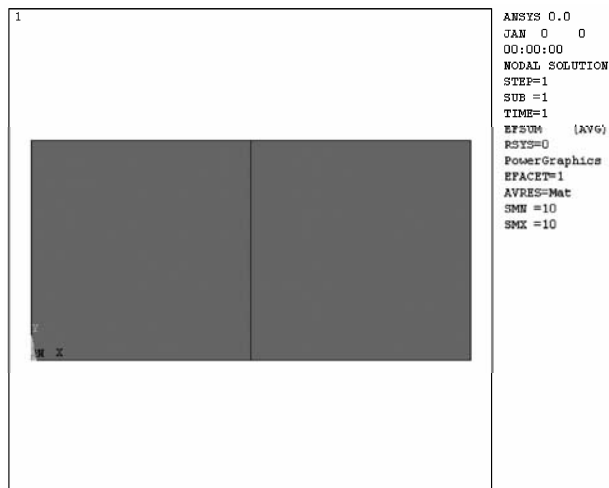


图 3-123 电场强度的轮廓线图

(8) 绘制电位移矢量轮廓线

选择路径 **Utility Menu**→**Plot**→**Results**→**Contour Plot**→**Nodal Solution**，在打开的对话框中选择路径 **Nodal Solution**→**Electric Flux Density**→**Electric flux density vector sum**。绘制电位移矢量的轮廓线如图 3-124 所示。

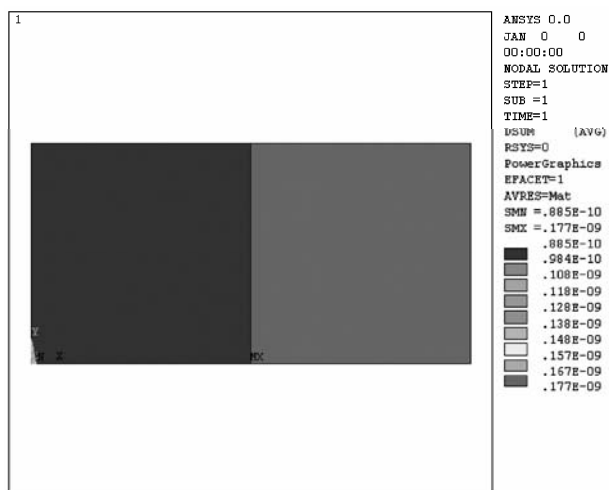


图 3-124 绘制电位移矢量轮廓线

2. 命令流操作

```

/PREP7
ET,1,PLANE121          ! 建立单元
MP,PERX,1,1            ! 定义空气材料属性
MP,PERX,2,2            ! 定义电介质材料属性

N,1                    ! 建立节点
N,3,1
FILL
NGEN,2,3,1,3,,,0.5
MAT,1                  ! 建立空气单元
E,1,2,5,4
MAT,2                  ! 建立电介质单元
E,2,3,6,5
NSEL,S,LOC,Y,0         ! 设定边界条件
D,ALL,VOLT,0
NSEL,S,LOC,Y,0.5
D,ALL,VOLT,5
NSEL,ALL
FINISH
/SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
PLNSOL,EF,SUM          ! 查看仿真结果
PLNSOL,D,SUM
FINISH

```

实例 3-8 正方形磁铁回路

正方形永磁铁回路，其中有一段空气间隙（图 3-125），参数如下：

永磁铁：

$$B_r = 1 \text{ T}$$

$$H_c = 150,000 \text{ A/m}$$

$$\mu_r = 5.305$$

几何参数：

$$a = .05 \text{ m}$$

$$b = .01 \text{ m}$$

$$g = .01 \text{ m}$$

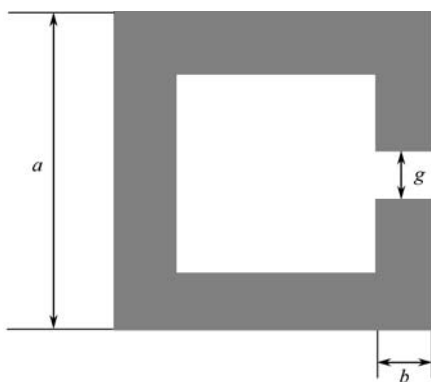


图 3-125 永磁铁回路



结果文件

——附带光盘 “Ch3\实例 3-8” 文件夹



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch3\实例 3-8.avi”

1. GUI 操作

(1) 设定图形界面的使用偏好

操作方法 Main Menu→Preferences，弹出“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“Magnetic-Nodal”（图 3-126），这样可以过滤不需要的图形工作菜单，简化后续操作。

(2) 定义模型参数

首先定义单元类型。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，出现“Element Types”单元类型对话框，此处单击“Add...”按钮添加单元（图 3-127）。

弹出“Library of Element Types”单元类型库对话框，左侧选择栏中选择“Magnetic Vector”，右侧栏中选择“Vect Quad 4nod13”（图 3-128）。

单击“OK”按钮确认后，出现“Element Types”单元类型对话框，提示已定义 PLANE13（图 3-129）。单击“Close”按钮关闭。

然后，定义材料属性。设定空气（材料 1）和永磁铁（材料 2）的相对磁导率。

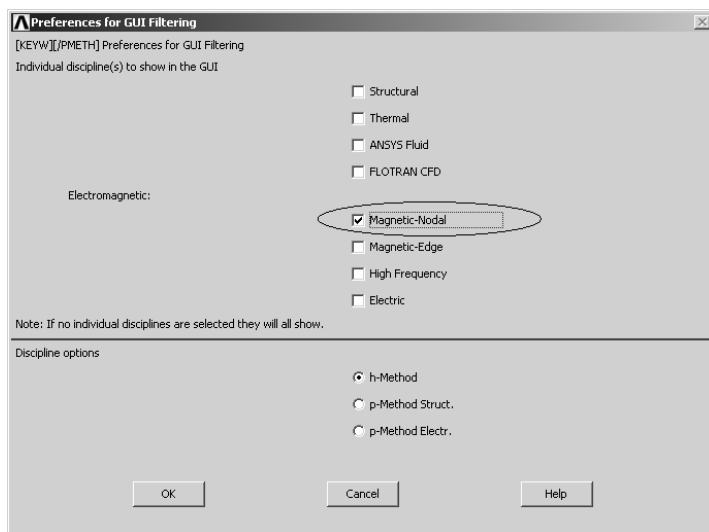


图 3-126 设定使用偏好为 Magnetic-Nodal

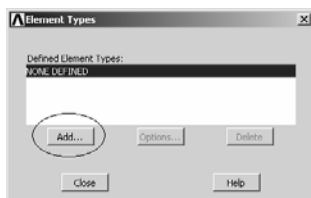


图 3-127 单击“Add...”按钮添加单元

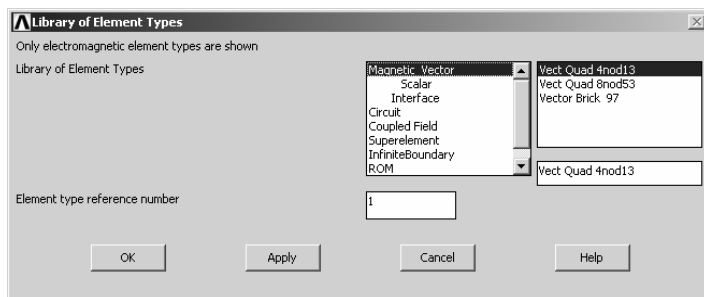


图 3-128 定义单元 PLANE13

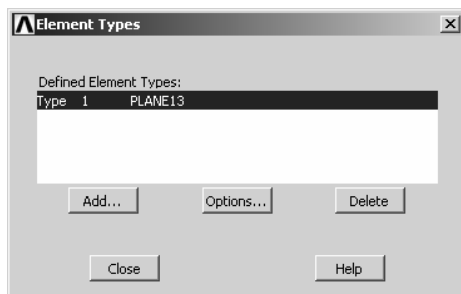


图 3-129 已定义 PLANE13

首先, 设定空气的相对磁导率。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models, 单击后打开“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框(图 3-130)。

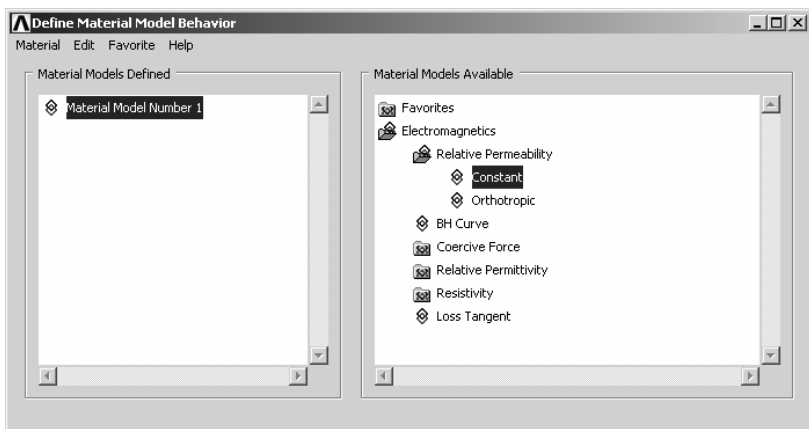


图 3-130 定义相对磁导率

选择路径 Electromagnetics→Relative Permeability→Constant, 双击打开对话框定义空气相对磁导率, 输入“1”(图 3-131)。单击“OK”按钮确认。

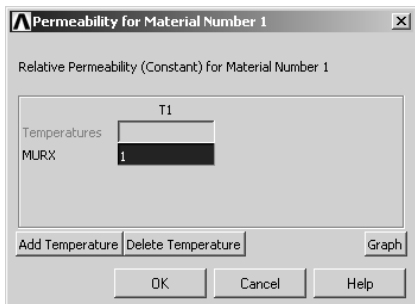


图 3-131 定义空气相对磁导率

然后, 定义材料 2 的相对磁导率。定义完材料 1 的相对磁导率后, “Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框选择“Material→New Model...”(图 3-132), 单击打开“Define Material ID”定义材料 ID 对话框, 输入“2”(图 3-133)。

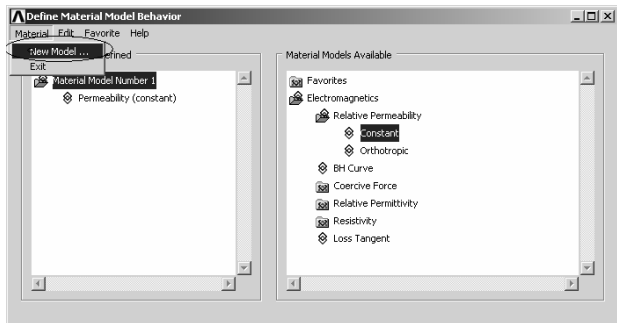


图 3-132 定义新材料

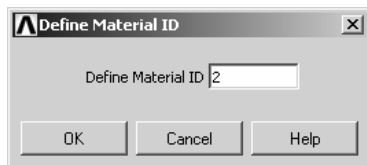


图 3-133 定义材料 ID 对话框

采用定义材料 1 的相对磁导率的方法，定义材料 2 的相对磁导率，其值为 5.30504。关闭“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框，完成定义。

最后，定义永磁铁即材料 2 的矫顽力。选择路径 Electromagnetcis→Coercive Force→Constant，双击打开对话框，定义矫顽力大小为 149990.0（图 3-134）。

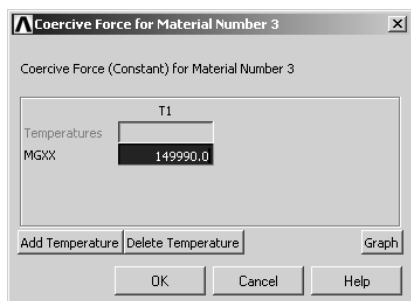


图 3-134 输入矫顽力值

（3）建立节点

第一个节点位置为 0，第六个节点位置为 0.05，其他节点均匀填充其中。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS，建立第一个节点（图 3-135）和第六个节点（图 3-136）。

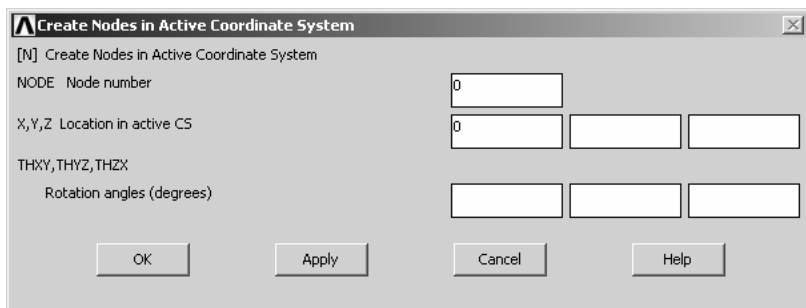


图 3-135 第一个节点

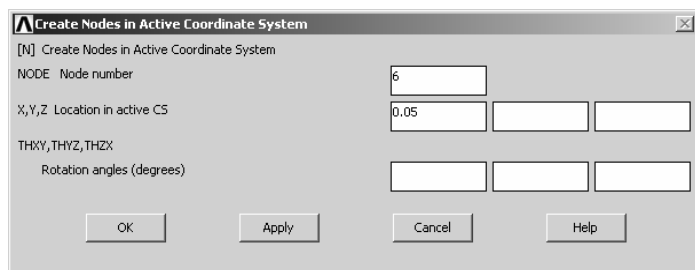


图 3-136 第六个节点

然后，填充其他节点，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Fill between Nds，填充节点，拾取节点 1 和节点 6。单击“OK”按钮确认，保持默认选项，自动定义其他节点（图 3-137）。

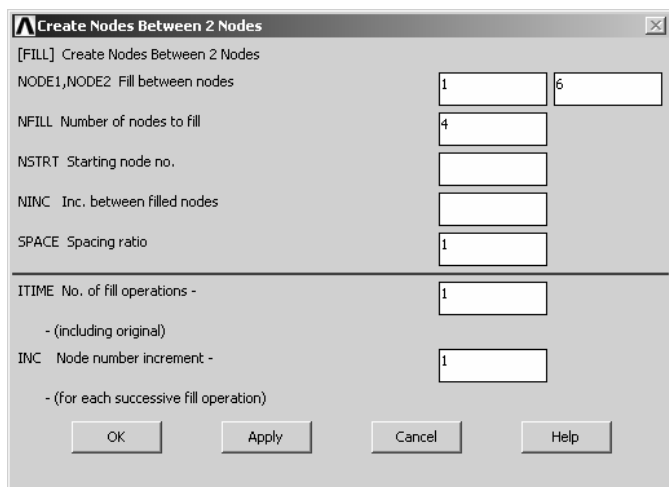


图 3-137 填充节点

最后，复制节点。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Copy**→**Nodes**→**Copy**。单击打开“Copy nodes”复制节点对话框，“ITIME”复制总数后输入“6”，“INC”输入“6”，“DY”Y 方向相对位移输入“1E-2”，其他保持默认设置，单击“OK”按钮确认操作（图 3-138）。

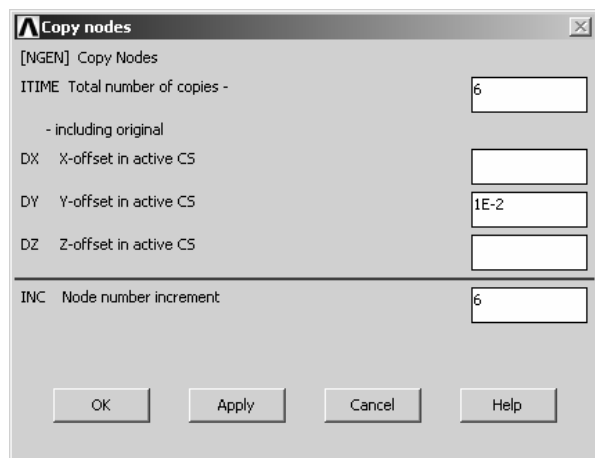


图 3-138 复制节点对话框

（4）建立单元

首先，选择材料 2 即永磁铁。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Elements**→**Elem Attributes**（图 3-139）。

然后，连接节点 1,2,8,7 建立单元。操作路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Elements**→**Auto Numbered**→**Thru Nodes**，拾取节点 1,2,8,7 形成单元。

然后，选择此单元，将这个单元复制 5 次，形成永磁铁的单元。操作路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Copy**→**Elements**→**Auto Numbered**，选择刚建立的单元，复制单元（图 3-140）。

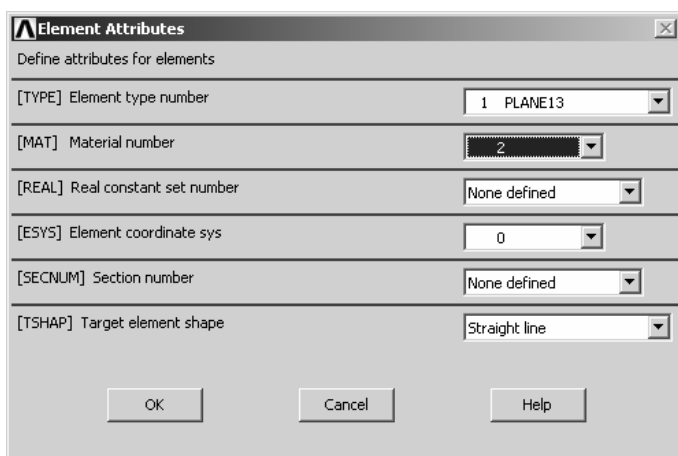


图 3-139 选择材料 2

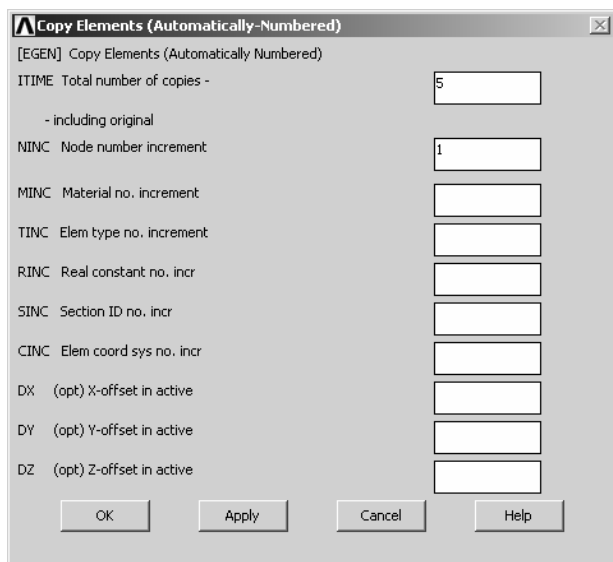


图 3-140 复制单元

然后，连接节点 25,26,32,31 建立单元，采用类似方法复制 5 次。

然后，连接节点 7,8,14,13 建立单元，复制此单元 3 次输入建立永磁铁单元一部分，其中节点编号增量输入“6”（图 3-141）。

然后，类似方法分别连接节点 23,24,30,29 和 11,12,18,17 建立单元。

最后，选择单元 1，即空气，连接节点 17,18,24,23 建立单元。

（5）施加负载

首先，选择外部节点，设定磁力线平行边界条件。

选择 $X=0$ 处节点。菜单路径 Utility Menu→Select→Entities。选择“By Location”，“X coordinates”，“Min, Max”框中输入“0”，其他保持默认，单击“Apply”按钮（图 3-142）。

附加选择 $X=5E-2$ 处节点，注意选择“Also Select”（图 3-143）。

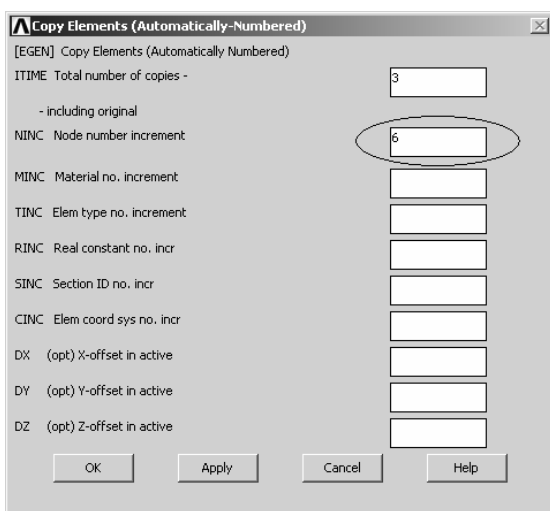


图 3-141 复制单元 3 次

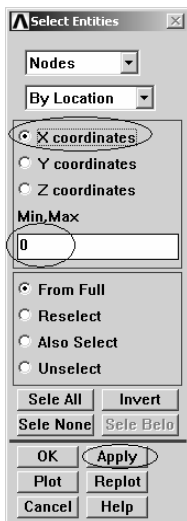


图 3-142 选择 X=0 处节点

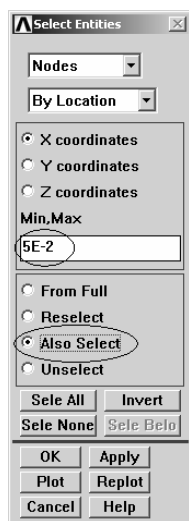


图 3-143 选择 X= 5E-2 处节点

继续附加选择 Y=0 和 Y=5E-2 处的节点，最后，单击“OK”按钮确认。

然后，在所有选择节点上施加磁力线平行边界条件，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Boundary→Vector Poten→On Nodes。单击“Pick All”选择所有节点（图 3-144），在“Apply A on Nodes”在节点上施加矢量磁位对话框中选择“AZ”，单击“OK”按钮确认（图 3-145）。

再次，选择所有节点（图 3-146），注意：单击“Cancel”按钮关闭对话框。

最后，耦合内部节点。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Coupling/Ceqn→Couple DOFs。选择节点 8,9,10,11,14,17,20,23,26,27,28,29，设定“NSET”编号为“1”，“Lab”为“AZ”（图 3-147）。

建立好的模型如图 3-148 所示（单元按材料类型编号）。

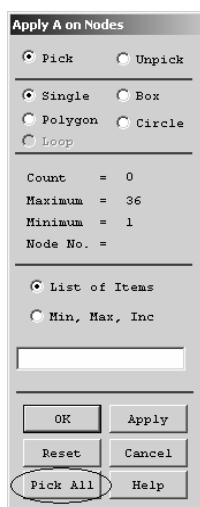


图 3-144 选择所有节点

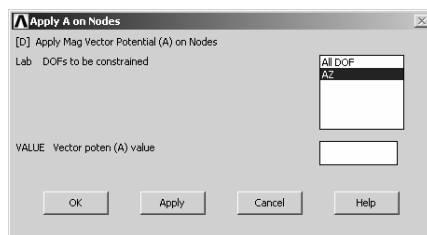


图 3-145 施加矢量磁位



图 3-146 选择所有节点



图 3-147 耦合内部节点

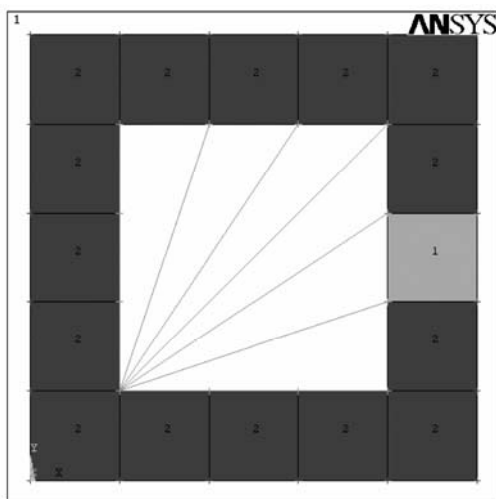


图 3-148 建立好的模型

(6) 求解磁场

选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Electromagnet→Static Analysis→Opt&Solv (图 3-148)。

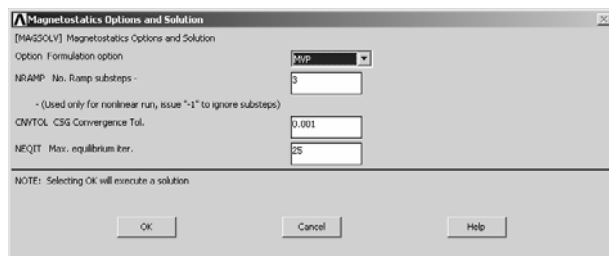


图 3-149 求解磁场

(7) 绘制磁力线图

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Flux Lines (图 3-150)。绘制结果如图 3-151 所示。

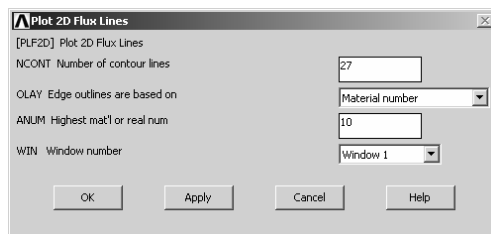


图 3-150 绘制磁力线

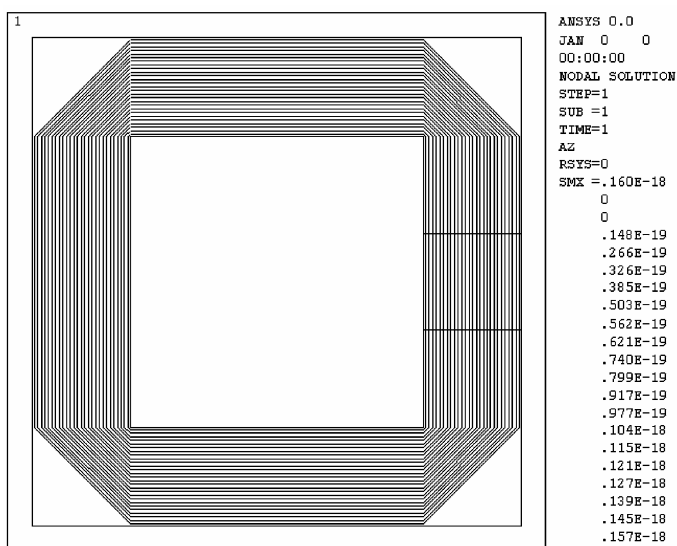


图 3-151 磁力线图

(8) 绘制磁场强度轮廓线

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Contour Plot→Nodal Solution。绘制结果如图 3-152 所示。

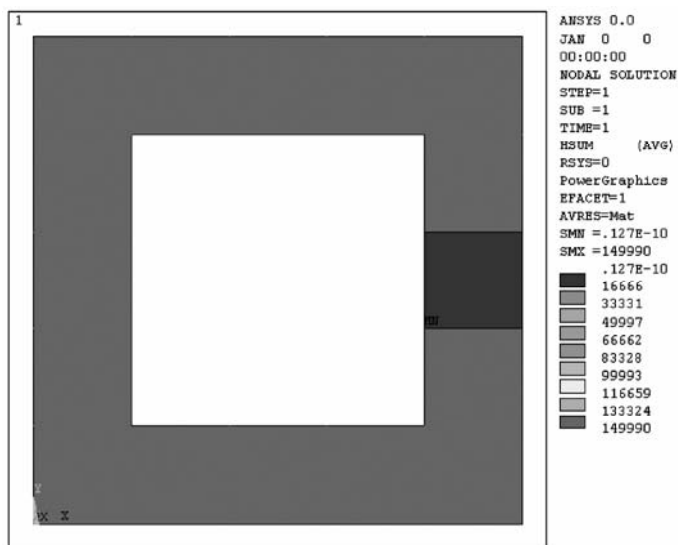


图 3-152 磁场强度轮廓线

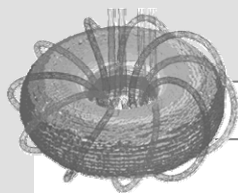
2. 命令流操作

```

/PREP7
ET,1,PLANE13          ! 定义单元
MP,MURX,1,1           ! 空气
MP,MURX,2,5.30504     ! 永磁铁
MP,MGXX,2,149990.0
N,1
N,6,5E-2
FILL
NGEN,6,6,1,6,1E-2,,1E-2
MAT,2                  ! 建立永磁铁单元
E,1,2,8,7
EGEN,5,1,-1
E,25,26,32,31
EGEN,5,1,-1
E,7,8,14,13
EGEN,3,6,-1
E,23,24,30,29
E,11,12,18,17
MAT,1                  ! 建立空气单元
E,17,18,24,23
NSEL,S,LOC,X,0        ! 设定边界条件
NSEL,A,LOC,X,5E-2

```

```
NSEL,A,LOC,Y,0
NSEL,A,LOC,Y,5E-2
D,ALL,AZ,0
NSEL,ALL
CP,1,AZ,8,9,10,11,14      ! 耦合节点
CP,1,AZ,17,20,23,26
CP,1,AZ,27,28,29
FINISH
/SOLU
MAGSOLV
FINISH
/POST1
PLF2D                     ! 绘制分析结果图形
PLNSOL,H,SUM
```



第4章 电磁场实体建模

使用实体建模的目的是为了使用户从繁杂的建立有限元模型的过程中解放出来。实体建模和生成网格操作可以加速建立有限元模型。

本章介绍实体建模的方法，使读者学会使用 ANSYS 建立点、线、面、体等，然后介绍布尔操作，方便模型建立。



本章内容

- 实体建模简介
- 工作平面
- 自底向上建模
- 自顶向下建模
- 布尔操作



本章案例

- 马蹄形磁铁建模
- 平行板电容建模
- 自顶向下建模
- 二维螺线管制动器建模
- 静电驱动梳建模

4.1 实体建模简介

ANSYS 中实体模型建立有两种主要方法：自底向上建模和自顶向下建模。当然也可以采用两种方式结合的方法建模。用户还可以使用布尔操作雕刻、拖拽、旋转、复制模型。

4.1.1 自底向上建模

在实体模型顶点处的点称为关键点，它是实体模型的最低级成员。如果在建立模型的时候用户使用关键点定义其他高级成员（线、面、体），则此建模过程称为自底向上建模。一定要牢记的是自底向上的模型是在当前激活的坐标系内定义的（图 4-1）。

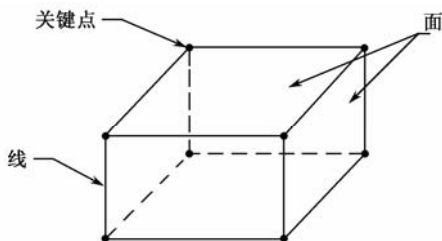


图 4-1 自底向上建模

4.1.2 自顶向下建模

自顶向下建模即用户使用 ANSYS 几何元来组合自己的模型，这些几何元是完整定义的线、面、体。当用户建立完一个几何元后，程序自动建立所有的与其相关的低级成员。注意：几何元是在工作平面内创建的，而自底向上的建模是在激活的坐标系上定义的。如果用户混合使用这两种技术，那么应该考虑使用“CSYS, WP”或“CSYS, 4”命令强迫坐标系跟随工作平面变化（图 4-2）。

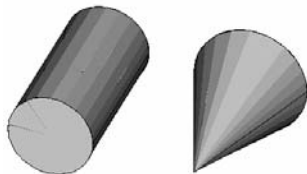


图 4-2 自顶向下建模

4.1.3 使用布尔操作

使用布尔操作可以雕刻建立实体模型，如使用相交、相减等布尔操作。布尔操作可以使用高级实体模型创建复杂形状（图 4-3）。

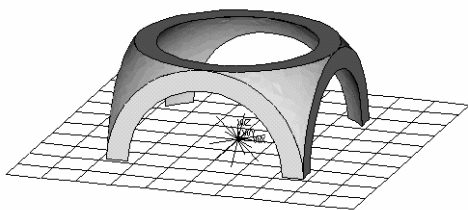


图 4-3 布尔操作创建复杂形状

4.1.4 拖拽和旋转操作

布尔操作虽然方便，但是耗费较多资源。有时采用拖拽和旋转操作可以更有效地建立模型（图 4-4）。

4.1.5 移动和复制操作

一个在模型中重复出现的复杂面或体只需建立一次，之后可以移动、旋转和复制到模型新的位置（图 4-5）。

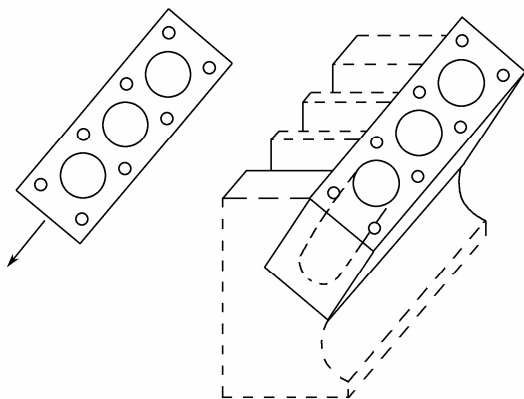


图 4-4 拖拽和旋转操作

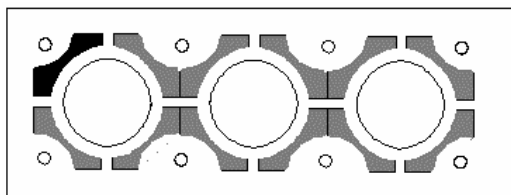


图 4-5 移动和复制操作

4.2 工作平面

虽然光标线在屏幕上看似是一个点，但是它其实是一条空间中垂直于屏幕的线（图 4-6）。为了用光标线选取一个点，用户需要定义一个虚拟平面，它与光标线相交时，将会产生一个点。此虚拟平面就是工作平面（图 4-6）。

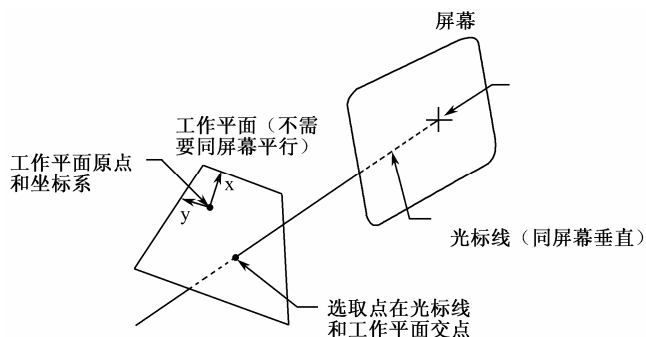


图 4-6 工作平面

每次只能定义一个工作平面，而且工作平面同坐标系无关，例如，工作平面可以有与坐标系不同的原点。

4.2.1 创建工作平面

ANSYS 启动后, 系统默认工作平面位于总体笛卡儿坐标系 X - Y 中, 其 X 和 Y 轴与总体笛卡儿坐标系 X 和 Y 轴共线。

可以使用点、节点和关键点来定义工作平面, 其操作方法分别为命令操作:

WPLANE、NWPLAN、KWPLAN

菜单操作:

Utility Menu→WorkPlane→Align WP with→XYZ Locations

Utility Menu→WorkPlane→Align WP with→Nodes

Utility Menu→WorkPlane→Align WP with→Keypoints

4.2.2 移动工作平面

用户可以分别通过关键点、节点和点的位置来确定工作平面的新位置, 此新位置与之前的平行。

命令操作:

KWPAVE、NWPAVE、WPAVE

菜单操作:

Utility Menu→WorkPlane→Offset WP to→Keypoints

Utility Menu→WorkPlane→Offset WP to→Nodes

Utility Menu→WorkPlane→Offset WP to→Global Origin
Utility Menu→WorkPlane→Offset WP to→Origin of Active CS
Utility Menu→WorkPlane→Offset WP to→XYZ Locations

用户还可以平移工作平面, 方向如下所述。

命令操作:

WPOFFS

菜单操作:

Utility Menu→WorkPlane→Offset WP by Increments

4.2.3 旋转工作平面

命令操作:

WPROTA

菜单操作:

Utility Menu→WorkPlane→Offset WP by Increments

4.3 群组命令介绍

在第2章及第3章中，已经学习了许多节点、单元等的操作，实体建模就是创建点、线、面、体等对象，其操作方式同节点、单元的操作非常相似，例如，创建、复制、显示等操作。

ANSYS 命令中，N 代表节点（Node），E 代表单元（Element），K 代表关键点（Keypoint），L 代表线（Line），A 代表面（Area），V 代表体（Volume）。例如，NPLLOT 即绘制节点，EPLLOT 即绘制单元。有时候，如果命令操作的是节点，N 有可能省略，例如，D 是在节点上施加约束，DK 是在关键点上施加约束。对于此类相似命令，用法相似，以后不再详细介绍，部分常用群组命令参见表 4-1。

表 4-1 部分常用群组命令

命令（X 代表 N, E, K, L, A 或者 V）	意 义
XDELE	删除 X
XPLOT	显示 X
XLIST	列出 X
XGEN	复制 X
XSEL	选择 X
XSUM	计算 X 集合资料（面积、边长等）
XMESH	网格化 X
XCLEAR	消除 X 的网格

4.4 自底向上建模

自底向上建模中，用户首先定义关键点，然后使用这些关键点创建高级实体成员（线、面、体）。

关键点是顶点，线是边界，面是表面，体是物体的内部。注意：它们之间有等级关系，体等级最高，由面围成，面由线围成，线又是由关键点确定的（图 4-7）。

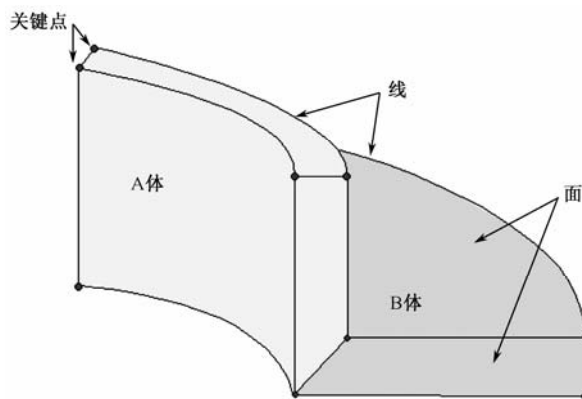


图 4-7 自底向上建模

4.4.1 关键点

关键点在当前激活的坐标系中生成，第 2 章中已经介绍过其基本的建立方法，这里介绍其他操作。

1. 生成关键点

(1) 在两个关键点之间填充关键点

命令操作：

KFILL

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Fill between KPs

如在关键点 1 和 5 之间添加节点（图 4-8）。

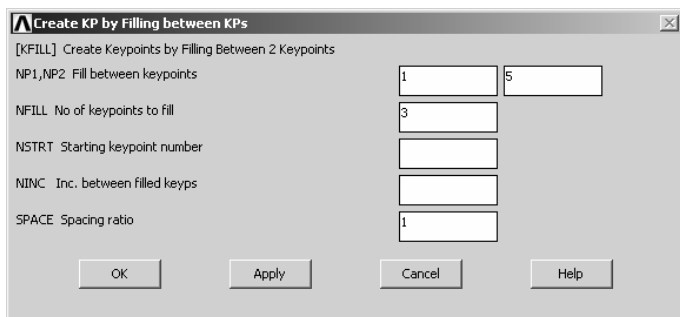


图 4-8 添加节点

(2) 复制节点

命令操作：

KGEN

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Keypoints（图 4-9）

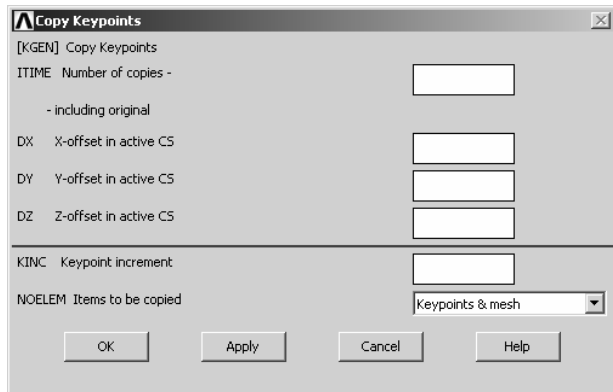


图 4-9 复制节点

(3) 生成对称关键点

命令操作:

KSYMM, Ncomp, NP1, NP2, NINC, KINC, NOELEM, IMOVE

Ncomp: 对称指示。

X - X 方向对称 (默认)。

Y - Y 方向对称。

Z - Z 方向对称。

NP1, NP2, NINC: 要复制的初始关键点、末尾关键点和关键点增量。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Keypoints (图 4-10)

执行以上操作后的效果如图 4-11 所示。

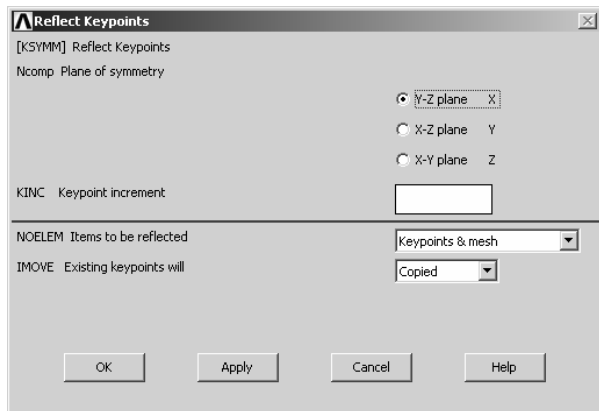


图 4-10 生成对称关键点

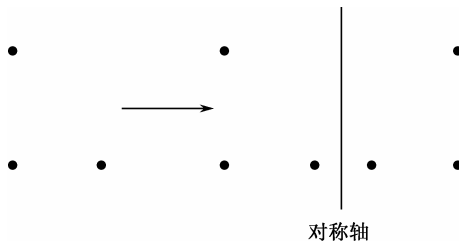


图 4-11 对称关键点示例

(4) 已知节点上定义关键点

命令操作:

KNODE, NPT, NODE

NPT: 建立的关键点的编号。

NODE: 定义关键点的节点。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→On Node

2. 显示关键点

命令操作:

KPLOT

菜单操作:

Utility Menu→Plot→Keypoints→Keypoints

Utility Menu→Plot→Specified Entities→Keypoints

3. 列出关键点

命令操作:

KLIST

菜单操作:

Utility Menu→List→Keypoints→Coordinates +Attributes

Utility Menu→List→Keypoints→Coordinates only

Utility Menu→List→Keypoints→Hard Points

4. 删除关键点

命令操作:

KDELE

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Keypoints

5. 选择关键点

命令操作:

KSEL

菜单操作:

Utility Menu→Select→Entities (图 4-12)



图 4-12 选择关键点



本节出现许多上一节介绍的群组命令, 如 KPLOT,KLIST 等, 请读者注意它们与 NPLOT,NLIST 等的异同。

4.4.2 硬点

硬点是一种特殊的关键点。硬点上可以施加负载或者获得数据。它与关键点的最大不同在于网格化之后, 硬点一定会生成节点, 而关键点则不一定。

定义硬点的方法如下所述。

命令操作:

HPTCREATE, TYPE, ENTITY, NHP, LABEL, VAL1, VAL2, VAL3

TYPE

LINE: 在线上定义硬点。

AREA: 在面上定义硬点 (不在边界上)。

ENTITY: 定义的硬点的线或面的编号。

NHP: 定义的硬点的编号。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Hard PT on line→Hard PT by ratio
 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Hard PT on line→Hard PT by coordinates
 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Hard PT on line→Hard PT by picking
 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Hard PT on line→Hard PT by coordinates
 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→Hard PT on line→Hard PT by picking

硬点的其他大部分操作同关键点，这里不再做过多介绍。

4.4.3 线

建立实体模型时，线为面和体的边界。线的建立和坐标系有关，笛卡儿坐标系下建立的为直线，柱坐标系和球坐标系下建立的则为曲线。例如，在柱坐标系下用 L 命令及其对应 GUI 操作建立的线即为弧线。第 2 章简单介绍了线的建立方法，这里介绍其他操作。

1. 建立圆弧线

命令操作：

LARC, P1, P2, RAD

连接两关键点 (P1,P2)，建立半径为 RAD 的圆弧，其中 PC 为圆弧曲率中心一方的关键点，它不一定是曲率中心。

菜单操作（图 4-13）：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs→By End KPs & Rad
 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs→Through 3 KPs

其效果如图 4-14 所示。

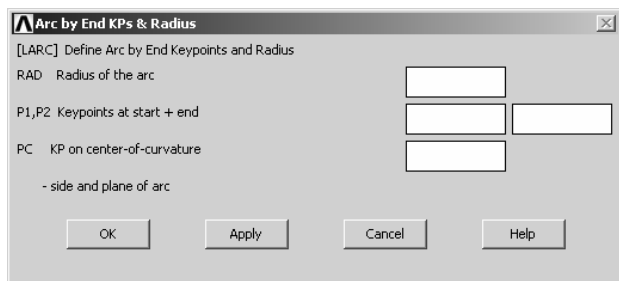


图 4-13 建立圆弧线

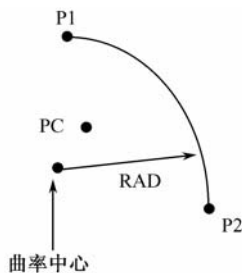


图 4-14 圆弧线效果

命令操作：

CIRCLE, PCENT, RAD, PAXIS, PZERO, ARC, NSEG

PCENT：定义圆弧中心的关键点。

RAD：圆弧半径。

PAXIS：定义圆弧轴的关键点。

PZERO：定义垂直于圆弧（与 PCENT 和 PAXIS 一起）的平面和圆弧起始位置，此点不一定在圆弧上。

ARC：以角度表示的弧长。

NSEG：圆弧划分的段数，完整的圆 NSEG = 4。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs→By Cent & Radius

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs→Full Circle

2. 拖拽

命令操作:

LDRAG, NK1, NK2, NK3, NK4, NK5, NK6, NL1, NL2, NL3, NL4, NL5, NL6

将一组关键点 (NK1,NK2,NK3,NK4,NK5,NK6) 沿着由 NL1,NL2,NL3,NL4,NL5,NL6 定义的路径拖拽 (图 4-15)。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Keypoints→Along Lines

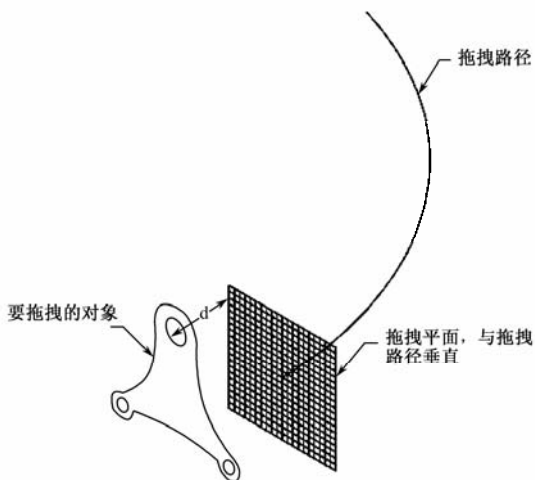


图 4-15 拖拽

3. 组合

将一条线同另一条线组合成一条新线。

命令操作:

LCOMB, NL1, NL2, KEEP

NL1,NL2: 要组合的线编号。

KEEP: 是否删除 NL1,NL2 及它们的交点。

0: 删除

1: 保留

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Lines

4. 分割

命令操作:

LDIV, NL1, RATIO, PDIV, NDIV, KEEP

NL1: 欲分割的线编号。
RATIO: 分割线段的比例。
NDIV: 分割的段数。
菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Line into 2 Ln's
Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Line into N Ln's
Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Lines w/ Options

5. 其他常用操作

这些操作属于前面介绍过的群组命令，读者应该很容易理解和掌握它们的用法，所以这里只做简单介绍，其他常用操作参见表 4-2。

表 4-2 其他常用操作

意 义	命 令 操 作	菜 单 操 作
列出	LLIST	Utility Menu→List→Lines
		Utility Menu→List→Picked Entities→Lines
显示	LPLOT	Utility Menu→Plot→Lines
		Utility Menu→Plot→Specified Entities→Lines
选择	LSEL	Utility Menu→Select→Entities
删除	LDELE	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Line and Below
		Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Lines Only
复制	LGEN	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Lines
		Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move / Modify→Lines

实例 4-1 马蹄形磁铁建模

通过点线操作，建立马蹄形磁铁的框架（图 4-16）。几何参数如下：

$a = 0.05\text{m}$
 $b = 0.2\text{m}$
 $R1 = 0.06\text{m}$
 $R2 = 0.11\text{m}$

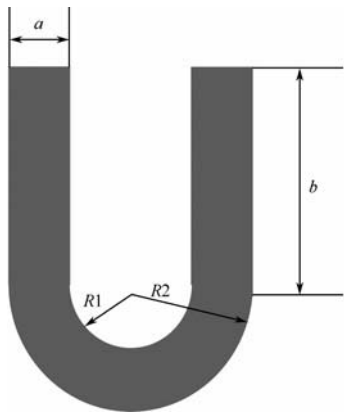
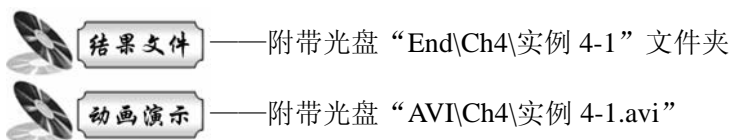


图 4-16 马蹄形磁铁



1. GUI 操作

(1) 显示关键点和线编号

选择路径 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering**，在“Plot Numbering Controls”绘图编号控制对话框选择“KP”，“LINE”（图 4-17），单击“OK”按钮确认。

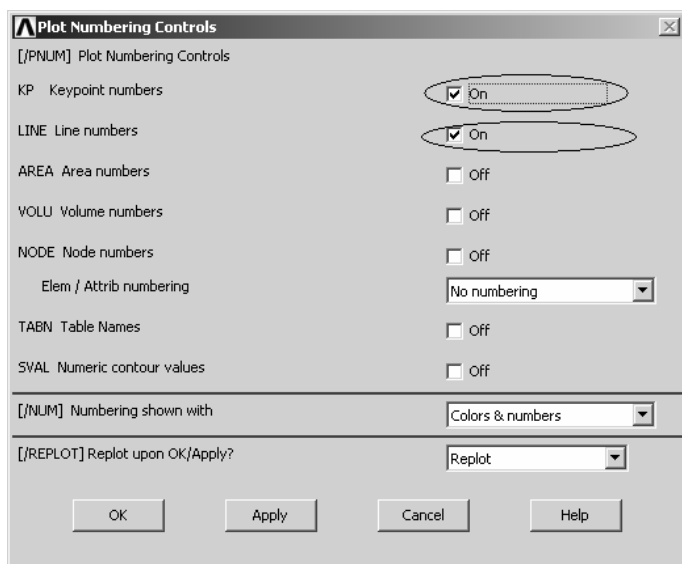


图 4-17 显示关键点和线编号

(2) 定义关键点

选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Keypoints**→**In Active CS**，首先定义关键点 1（图 4-18）。

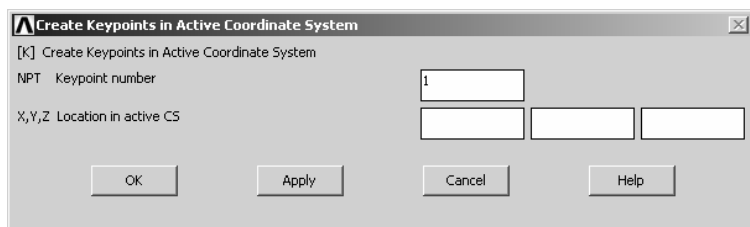


图 4-18 定义关键点 1

然后，用类似方法定义关键点 2（-0.05,0,0），3（-0.11,0.2,0），4（-0.06,0.2,0）。

(3) 生成对称关键点

选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Reflect**→**Keypoints**，输入框中输入“3”（图 4-19），单击“OK”按钮。然后采用默认设置，即在 X 方向对称，单击“OK”按钮确认（图 4-20）。

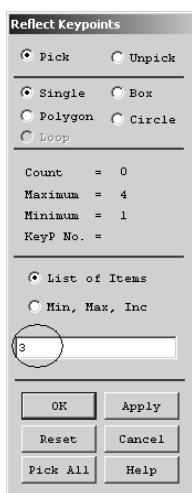


图 4-19 选择关键点 3

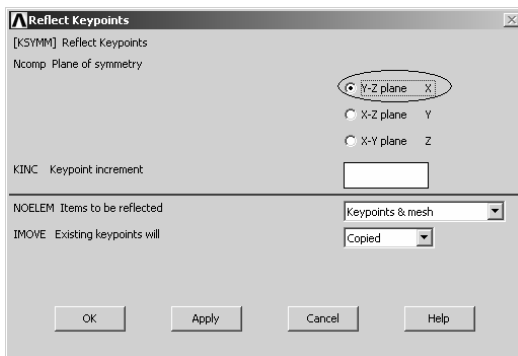


图 4-20 在 X 方向对称

(4) 建立圆弧

选择路径 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Lines → Arcs → By Cent & Radius, 拾取关键点 1, 然后输入框中输入 “-0.06” (负号表示方向), 单击 “OK” 按钮 (图 4-21), 建立 180° 圆弧 (图 4-22)。

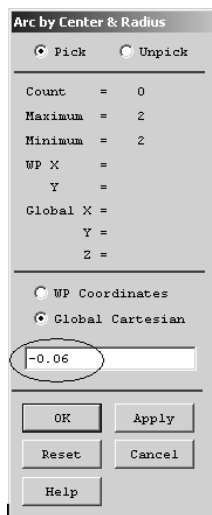


图 4-21 设定半径

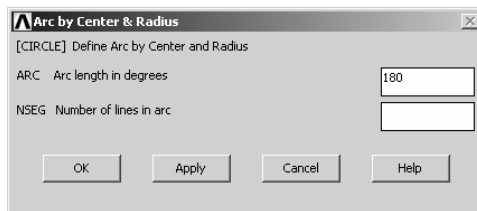


图 4-22 设定弧长

同样方法建立以关键点 1 为中心, 半径为 0.11 的 180° 圆弧。

(5) 定义线及生成对称线

选择路径 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Lines → Lines → In Active Coord, 连接线 3 和 9, 4 和 6, 3 和 4 定义线。

然后生成对称线。选择路径 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Reflect → Lines, 选择关节点 5,6,7 (图 4-23), 单击 “OK” 按钮确认, 然后生成 X 方向对称的线 (图 4-24)。

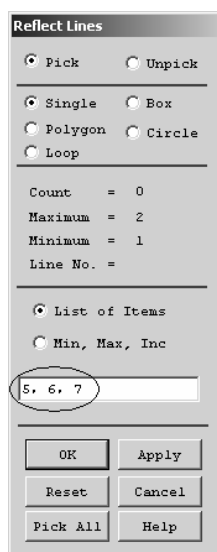


图 4-23 选择关键点

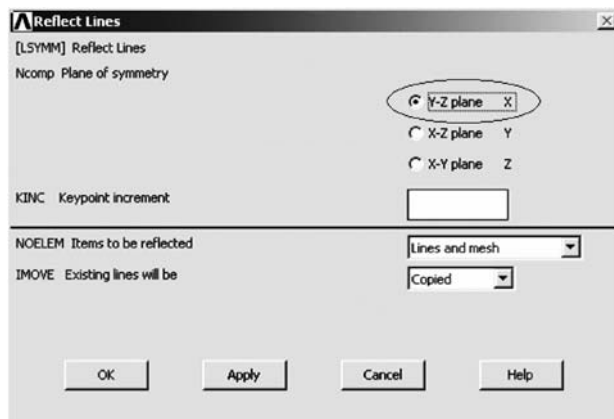


图 4-24 X 方向对称

建立的模型如图 4-25 所示。

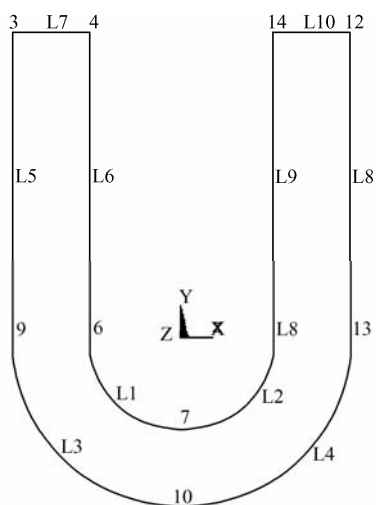


图 4-25 建立的模型

2. 命令流操作

```
/PREP7
```

```
/PNUM, KP, 1
```

! 显示关键点和线编号

```
/PNUM, LINE, 1
```

```
K, 1
```

```
K, 2, -0.05
```

! 为建立圆弧做准备, 标定圆弧其实方向

```
K, 3, -0.11, 0.2
```

```
K, 4, -0.06, 0.2
```

```

KSYMM,X,3                ! 关于 Y 轴及在 X 方向生成点 3 的对称点
CIRCLE,1,0.06,,2,180     ! 建立 180° 圆弧
CIRCLE,1,0.11,,2,180

L,3,9
L,4,6
L,3,4
LSYMM,X,5,7              ! 关于 Y 轴及在 X 方向生成线 5,6,7 的对称线
FINISH

```

命令流操作说明:

(1) 建立圆弧

建立圆弧时, 标定起始方向的点 2 不在圆弧上, 它只是起到标定方向的作用, 此点也可以定义在圆弧上。

(2) 生成对称线

生成对称线时, 如果生成的线处有关键点, 则程序会自动生成。

4.4.4 面

学习过前面关于点、线操作和群组命令介绍, 面操作大部分都属于群组操作, 操作方法参见表 4-3。

表 4-3 面操作的操作方法

意 义	命 令	菜 单 路 径
以线为边界定义面	AL	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→By Lines
拖拽(图 4-26)	ADRAG	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Along Lines
旋转(图 4-27)	AROTAT	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→About Axis
复制	AGEN	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Areas Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move/Modify→Areas→Areas
对称复制	ARSYM	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Areas
列出	ALIST	Utility Menu→List→Areas Utility Menu→List→Picked Entities→Areas
显示	APLOT	Utility Menu→Plot→Areas Utility Menu→Plot→Specified Entities→Areas
选择	ASEL	Utility Menu→Select→Entities
删除	ADELE	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Area and Below Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete→Areas Only

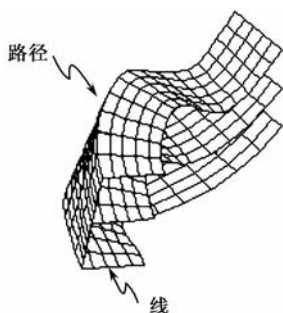


图 4-26 拖拽

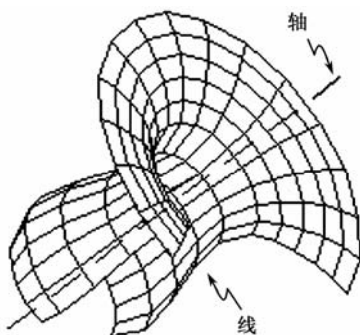


图 4-27 旋转

4.4.5 体

学习过前面关于点、线、面操作和群组命令介绍，体操作大部分都属于群组操作，操作方法参见表 4-4。

表 4-4 体操作的操作方法

意 义	命 令	菜 单 路 径
定义体	V	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Arbitrary → Through KPs
以面为边界定义体	VA	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Arbitrary → By Areas
拖拽	VDRAG	Main Menu → Preprocessor → Operate → Extrude → Along Lines
旋转	VROTAT	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Extrude → About Axis
复制	VGEN	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Copy → Volumes Main Menu → Preprocessor → Modeling → Move/Modify → Volumes
对称复制	VSMM	Main Menu → Preprocessor → Modeling
列出	VLIST	Utility Menu → List → Picked Entities → Volumes Utility Menu → List → Volumes
显示	VPLT	Utility Menu → Plot → Specified Entities → Volumes Utility Menu → Plot → Volumes
选择	VSEL	Utility Menu → Select → Entities
删除	VDELE	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Delete → Volume and Below Main Menu → Preprocessor → Modeling → Delete → Volumes Only

实例 4-2 平行板电容建模

建立一个平行板电容，上部和下部有不同电介质，且厚度相同。参数如下（图 4-28）：

$$a = 0.01\text{m}$$

$$b = 0.005\text{m}$$

$$c = 0.001\text{m}$$

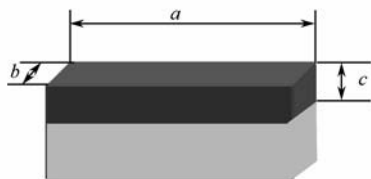


图 4-28 平行板电容



结果文件

——附带光盘 “End\Ch4\实例 4-2” 文件夹



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch4\实例 4-2.avi”

1. GUI 操作

(1) 显示编号

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Areas。选取点、线、面显示编号（图 4-29）。

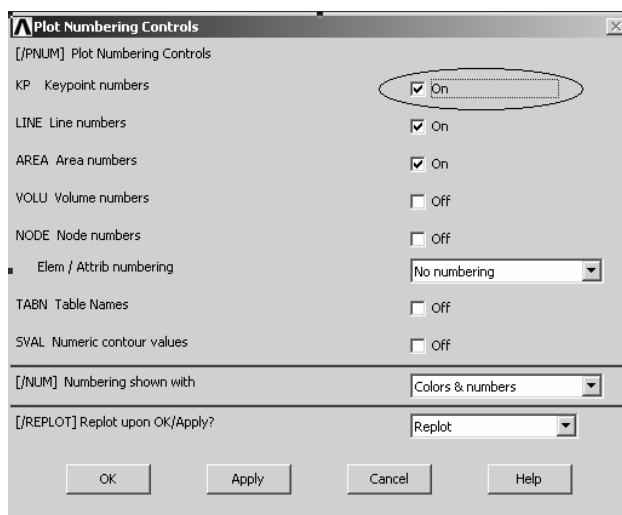


图 4-29 显示编号

(2) 建立面 1

首先定义关键点 1 (0,-0.001,0), 2 (0.01,-0.001,0), 3 (0.01,-0.001,0.005), 4 (0,-0.001,0.005)。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS。输入上述坐标。

然后, 连接关键点定义面。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs。

(3) 面的拖拽

首先, 定义拖拽线和路径。定义关键点 5 (0,0,0), 6 (0.01,0,0), 7 (0,0.001,0)。然后连接节点生成线。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord, 连接关键点 5 和 6, 1 和 5, 5 和 7 生成线。

然后拖拽。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Lines→Along Lines。选择线 6,7 作为拖拽线, 5 作为路径 (图 4-30)。

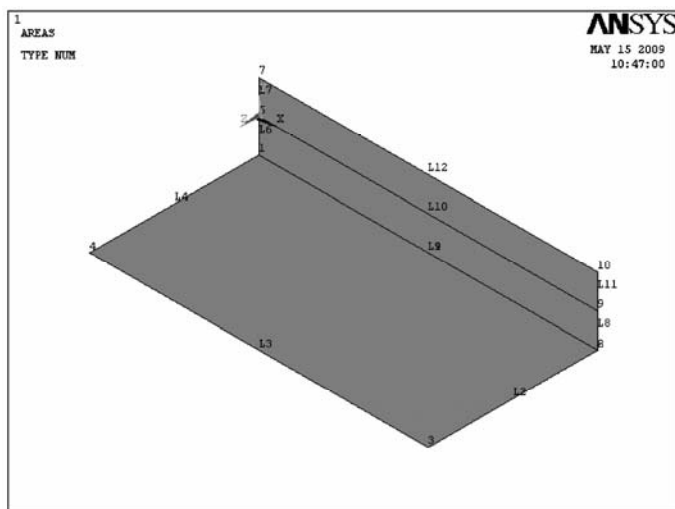


图 4-30 拖拽

(4) 生成对称面

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Areas, 生成对称面 (图 4-31)。

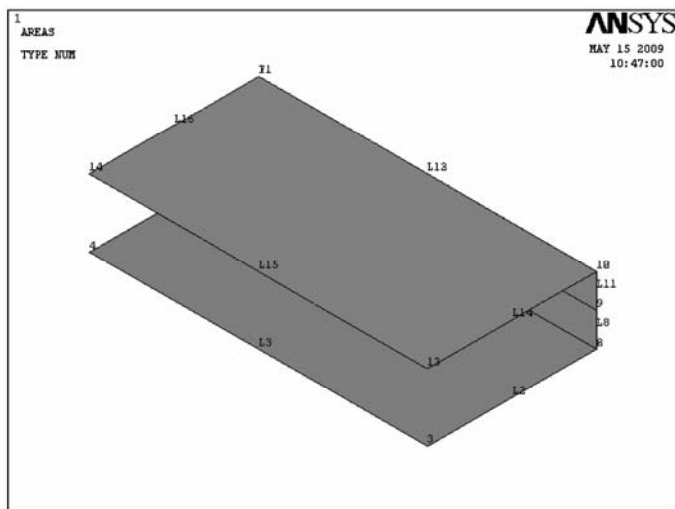


图 4-31 生成对称面

(5) 体的拖拽

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→Along Lines, 沿线 8 拖拽面 1 (图 4-32)。

(6) 生成对称体

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect→Volumes, 使体 1 关于 Y 方向对称 (图 4-33)。

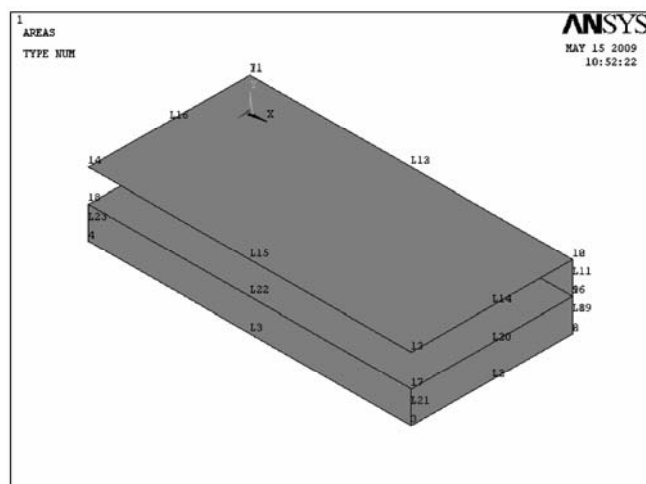


图 4-32 体的拖拽

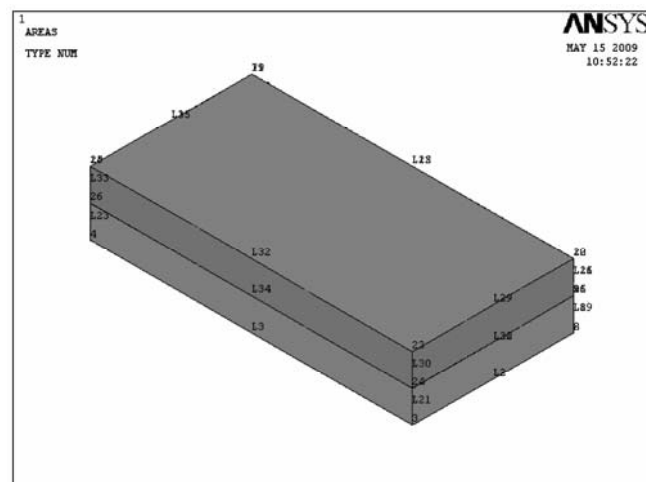


图 4-33 生成对称体

2. 命令流操作

```

/PREP7
/PNUM,KP,1                ! 显示编号
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,1
K,1,0,-0.001
K,2,0.01,-0.001
K,3,0.01,-0.001,0.005
K,4,0,-0.001,0.005
A,1,2,3,4                ! 建立面 1
K,5,0,0,0

```


K,6,0.01,0,0	
K,7,0,0.001,0	
L,5,6	
L,1,5	
L,5,7	
ADRAG,6,7,,,,,5	! 面的拖拽
ARSYM,Y,1	! 生成对称面
VDRAG,1,,,,,8	! 体的拖拽
VSYMM,Y,1	! 生成对称体

4.5 自顶向下建模

自顶向下建模中,用户使用几何元组建模型。当用户建立完一个几何元后,程序自动建立所有的与其相关的低级成员。

任何建立的面元都在工作平面上,而且其面积必须大于 0。任何体元都建立于工作平面上。



面元和体元之间的界面会产生有限元模型的不连续,用户需要使用特定方法黏合这些裂缝。

4.5.1 定义矩形或六面体

定义矩形或六面体有多种方法,可以在已知两点坐标情况下定义,也可以在已知一点坐标和边长情况下定义。

1. 通过对角线上两点坐标定义

定义面元方法如下所述。

命令操作:

RECTNG, X1, X2, Y1, Y2

两点坐标为 (X1,Y1) 和 (X2,Y2)。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions (图 4-34)

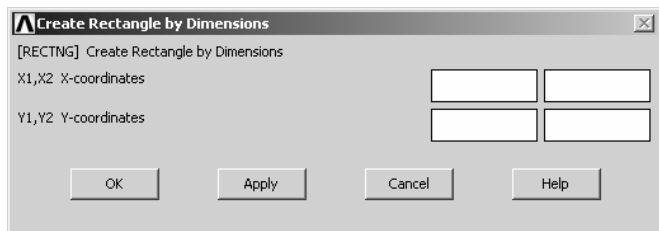


图 4-34 已知对角线上两点坐标定义面元

定义体元方法如下所述。

命令操作：

BLOCK, X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2

两点坐标为 (X1,Y1,Z1) 和 (X2,Y2,Z2)。

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions (图 4-35)

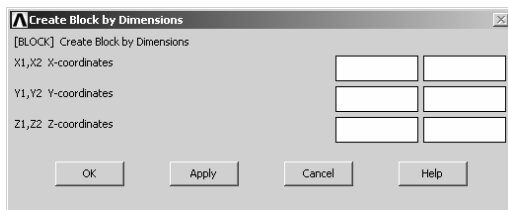


图 4-35 已知对角线上两点坐标定义体元

2. 通过角点和边长定义

命令操作：

BLC4, XCORNER, YCORNER, WIDTH, HEIGHT, DEPTH

XCORNER, YCORNER: 角点坐标。

WIDTH, HEIGHT, DEPTH: X, Y, Z 方向尺寸, 如果 DEPTH = 0 (默认) 则建立面元

菜单操作：

建立面元：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By 2 Corners (图 4-36)

建立体元：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By 2 Corners & Z (图 4-37)

3. 通过中心点和边长定义

命令操作：

BLC5, XCENTER, YCENTER, WIDTH, HEIGHT, DEPTH

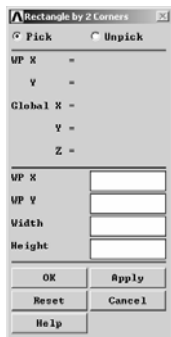


图 4-36 建立面元



图 4-37 建立体元

XCENTER, YCENTER: 中心坐标。

WIDTH, HEIGHT, DEPTH: X, Y, Z 方向尺寸, 如果 DEPTH = 0 (默认) 则建立面元。

命令操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Centr & Cornr

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Centr,Cornr,Z

4.5.2 定义环形面和柱

此组命令也是面和体采用同种命令, 但是菜单操作有所差别。

1. 以工作平面原点为圆心建立环面

命令操作:

PCIRC, RAD1, RAD2, THETA1, THETA2

RAD1, RAD2: 内外环半径。

THETA1, THETA2: 圆环起始和终结角。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→By Dimensions (图 4-38)

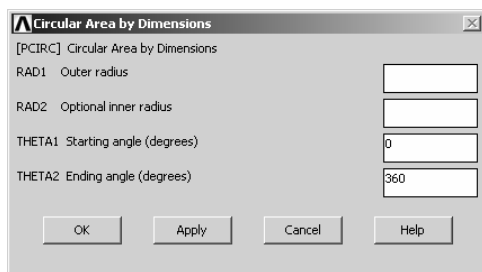


图 4-38 以工作平面原点为圆心建立环面

2. 通过中心点定义

命令操作:

CYL4, XCENTER, YCENTER, RAD1, THETA1, RAD2, THETA2, DEPTH

XCENTER, YCENTER: 环中心。

RAD1, RAD2: 内外环半径。

THETA1, THETA2: 圆环起始和终结角。

DEPTH: 距工作平面的距离, 如果 DEPTH = 0 (默认) 则为圆环面。

菜单操作:

建立面元: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Annulus

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Partial Annulus (图 4-39)

建立体元: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Hollow Cylinder

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Partial Cylinder (图 4-40)

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Solid Cylinder

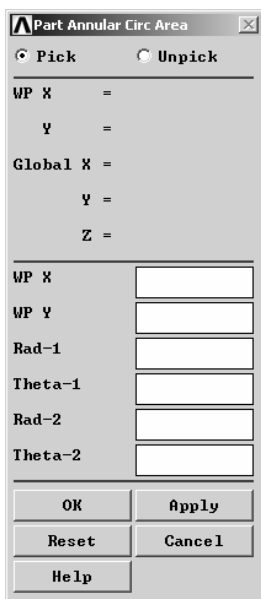


图 4-39 建立圆环面

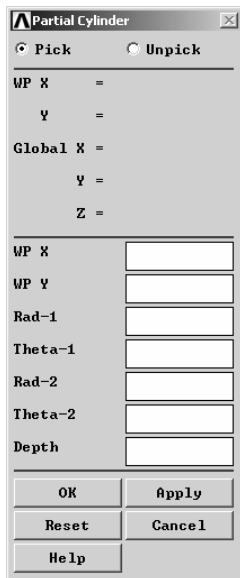


图 4-40 建立圆环体

3. 通过环面直径上点定义

命令操作:

CYL5, XEDGE1, YEDGE1, XEDGE2, YEDGE2, DEPTH

建立以点 (XEDGE1,YEDGE1) 和点 (XEDGE2,YEDGE2) 为直径两端, 深度默认为 0 (面) 的环。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→By End Points

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→By End Pts & Z

Main Menu→Preprocessor→Trefitz Domain→TZ Geometry→Create→Volume→Cylinder→By End Pts & Z

4. 建立环形面和柱命令说明

使用上述命令建立环形时, 如有 THETA1,THETA2 输入, 则圆环自小角度开始, 以大角度结束, 而与 THETA1,THETA2 输入顺序无关 (图 4-41)。

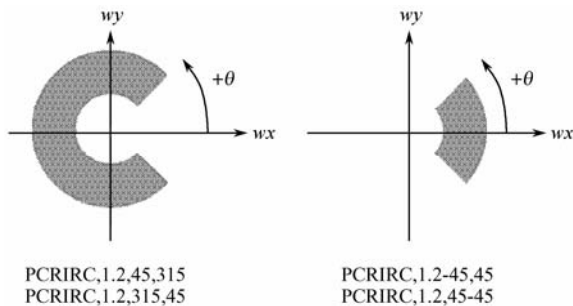


图 4-41 命令说明

4.6 布尔操作

布尔操作提供一种逻辑操作一组数据的方法，使用此类操作可以相交、合并或者剪切图形。

布尔操作众多，但是理解并不复杂，命令简单，而且布尔操作基本上都属于群组操作，所以，这里主要通过图示做简单介绍，图形的实线部分为所生成的图形。

4.6.1 布尔操作设置

使用布尔操作时，用户需要决定是否保留原图形。为设置这种操作，可以采用 **BOPTN**, **Lab**, **Value** 操作（图 4-42）。

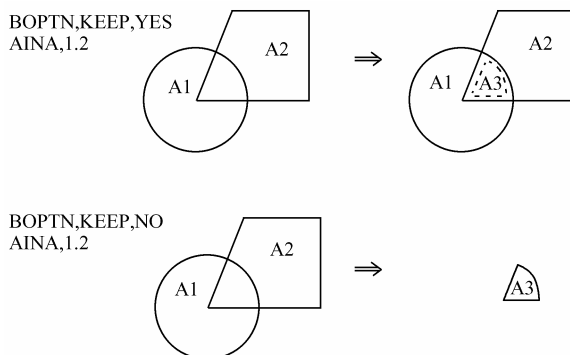


图 4-42 布尔操作设置

4.6.2 相交

此类命令格式为 **XINY**，即 **X** 与 **Y** 相交，参见表 4-5。

表 4-5 相交

建立相交对象	命 令	菜 单 操 作
线（图 4-43）	LINL	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Intersect → Common → Lines
面（图 4-44）	AINA	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Intersect → Common → Areas
体（图 4-45）	VINV	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Intersect → Common → Volumes
线和面（图 4-46）	LINA	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Intersect → Line with Area
面和体（图 4-47）	AINV	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Intersect → Area with Volume
线和体（图 4-48）	LINV	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Intersect → Line with Volume

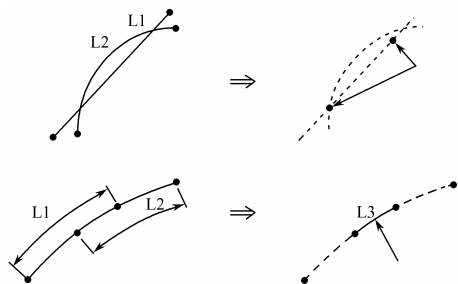


图 4-43 LINL

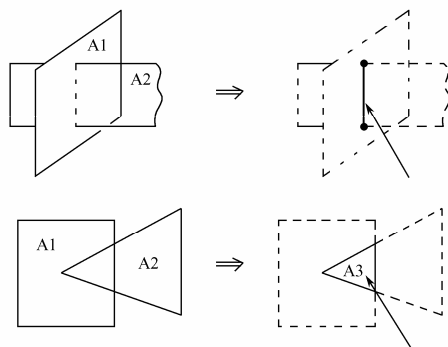


图 4-44 AINA

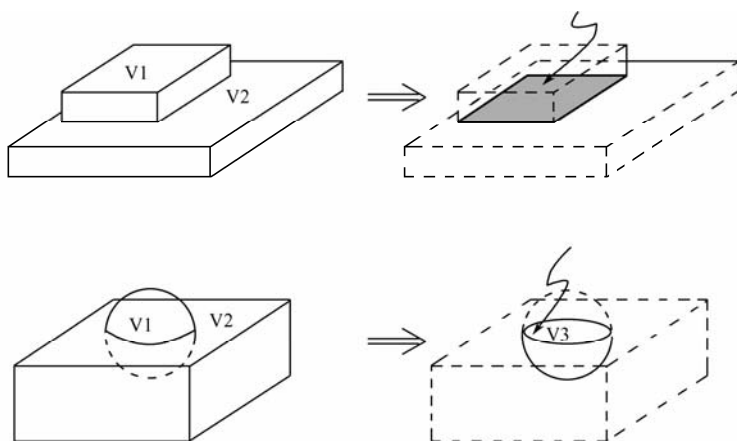


图 4-45 VINV

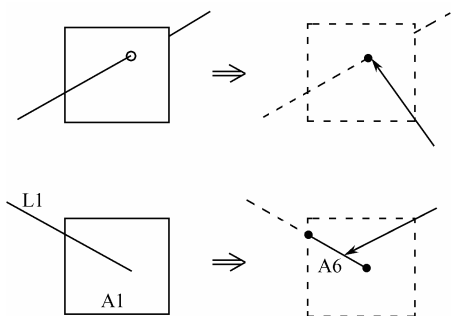


图 4-46 LINA

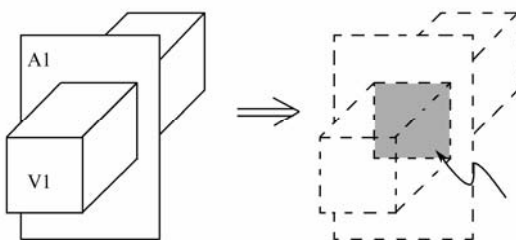


图 4-47 AINV

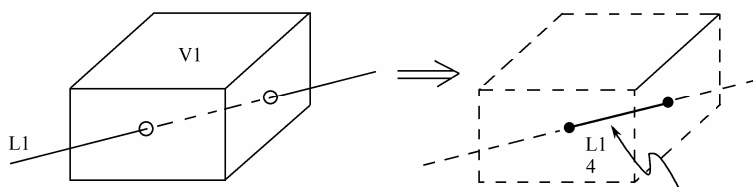


图 4-48 LINV

4.6.3 相加

此操作通过相加定义一个由所有原始部分组合成的对象。结果对象没有缝隙，不需要进行去缝处理。命令格式为 XADD（表 4-6）。

表 4-6 相加

相 加	命 令	菜 单 操 作
面相加（图 4-49）	AADD	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Areas
体相加（图 4-50）	VADD	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Volumes

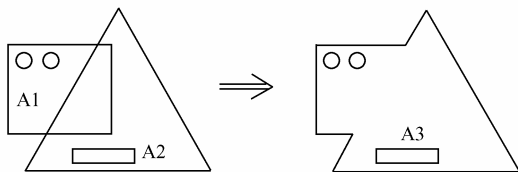


图 4-49 AADD

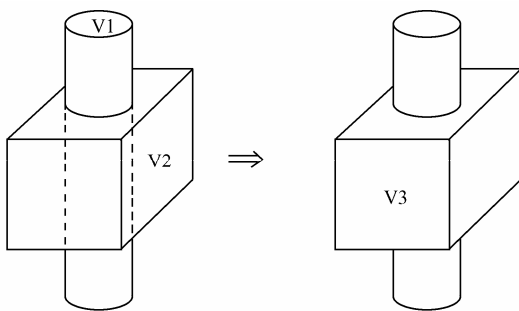


图 4-50 VADD

4.6.4 相减

此类命令格式为 XSBY，即用 Y 减去 X 和 Y 的重叠部分（表 4-7）。

表 4-7 相减

相 减	命 令	菜 单 操 作
线相减（图 4-51）	LSBL	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→Lines Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→With Options→Lines Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Line by Line Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→With Options→Line by Line
面相减（图 4-52）	ASBA	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→Areas Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→With Options→Areas Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→Area by Area Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Divide→With Options→Area by Area

续表

相 减	命 令	菜 单 操 作
体相减 (图 4-53)	VSBV	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Subtract → Volumes Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Subtract → With Options → Volumes
面减线 (图 4-54)	LSBA	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → Line by Area Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → With Options → Line by Area
体减线 (图 4-55)	LSBV	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → Line by Volume Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → With Options → Line by Volume
体减面 (图 4-56)	ASBV	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → Area by Volume Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → With Options → Area by Volume
面减线 (图 4-57)	ASBL	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → Area by Line Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → With Options → Area by Line
面减体 (图 4-58)	VSBA	Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → Volume by Area Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → With Options → Volume by Area

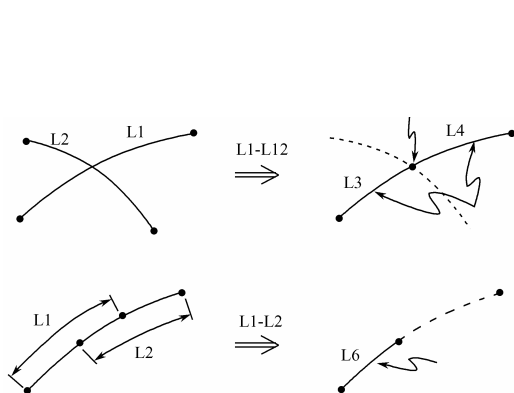


图 4-51 LSBL

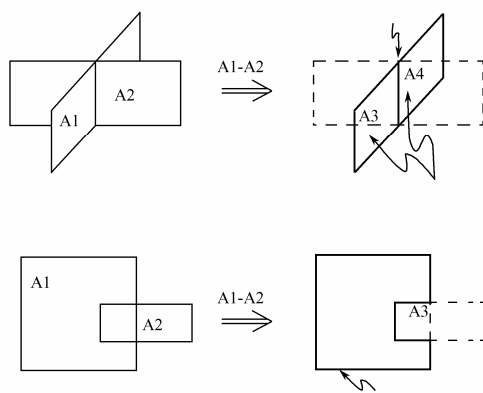


图 4-52 ASBA

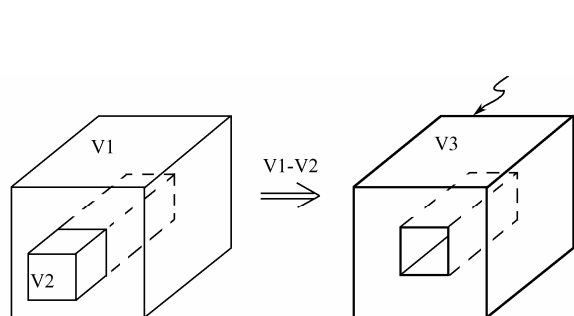


图 4-53 VSBV

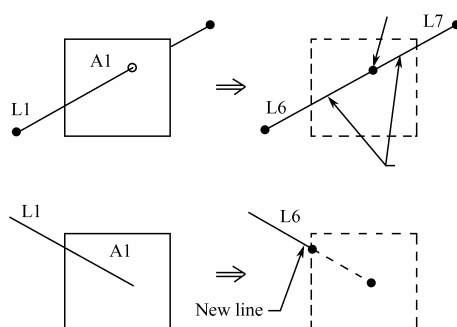


图 4-54 LSBA

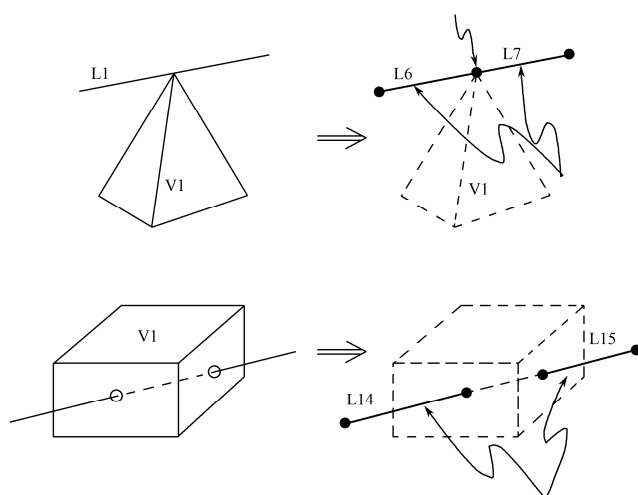


图 4-55 LSBV

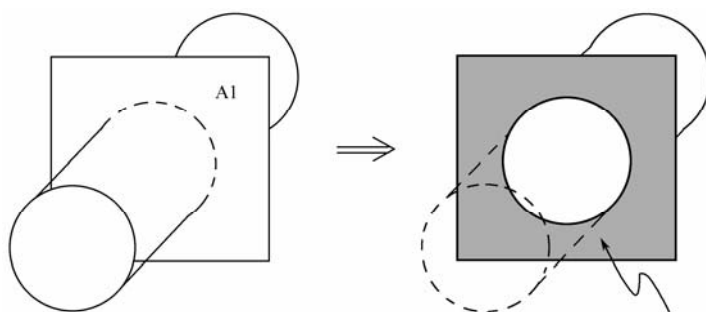


图 4-56 ASBV

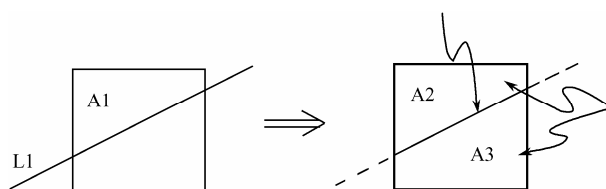


图 4-57 ASBL

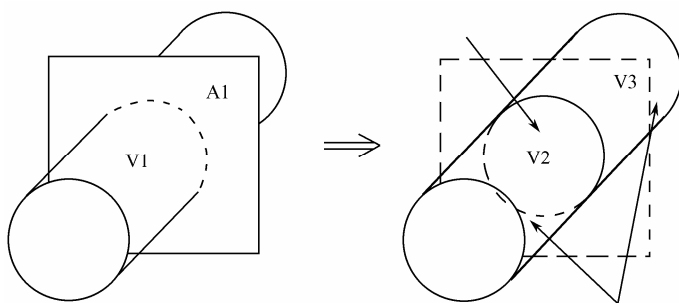


图 4-58 VSBA

4.6.5 重合

重合操作结合两个或多个对象形成三个或多个对象，其结果和“相加”类似，但是此操作会在重合部分产生边界。因此，此操作产生相对来说不太复杂的区域，其图形网格划分效果也比采用相加操作的更好。

此类命令格式为 **XOVLAP**。参见表 4-8。

表 4-8 重合

重 合	命 令	菜 单 操 作
线 (图 4-59)	LOVLAP	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Lines
面 (图 4-60)	AOVLAP	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Areas
体 (图 4-61)	VOVLAP	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Volumes

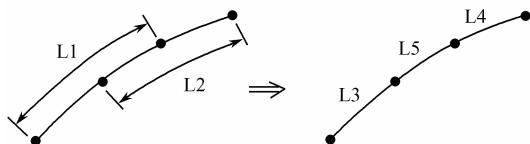


图 4-59 LOVLAP

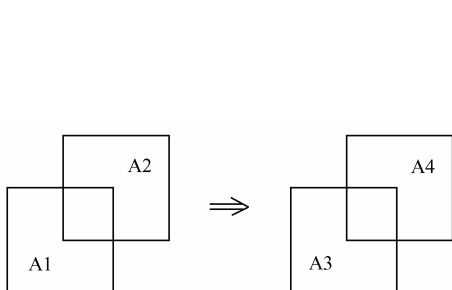


图 4-60 AOVLAP

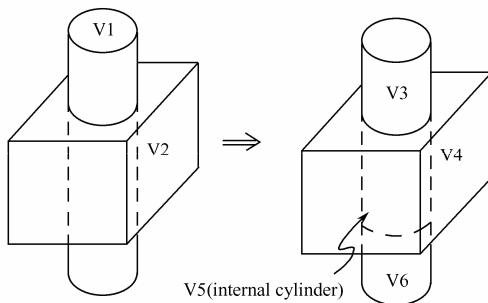


图 4-61 VOVLAP

4.6.6 黏结

实体建模产生的模型界面会产生有限元模型的不连续，用户可以使用此方法黏结这些裂缝。此操作和重合类似，除了它只适用于只有边界相交的对象。结果对象保持它们的个体特征，但是在结合处相连，参见表 4-9。

表 4-9 黏结

产生新的对象	命 令	菜 单 操 作
线 (图 4-62)	LGLUE	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Lines
面 (图 4-63)	AGLUE	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas
体 (图 4-64)	VGLUE	Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Volumes

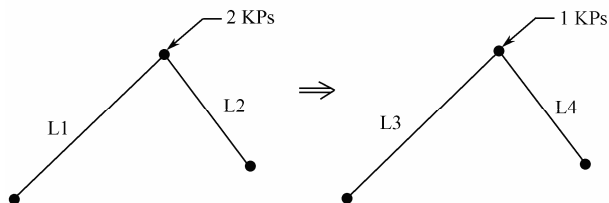


图 4-62 LGLUE

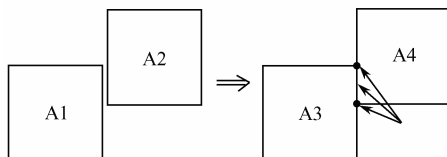


图 4-63 AGLUE

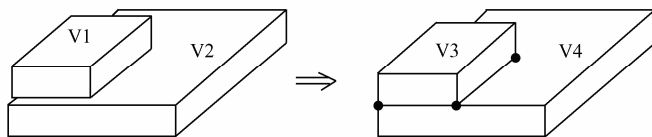


图 4-64 VGLUE

实例 4-3 自顶向下建模

建立一个平行板电容，在上极板中间有一个半径为 r 的圆孔，几何参数如下 (图 4-65)：

$$\begin{aligned} a &= 0.01\text{m} \\ b &= 0.005\text{m} \\ c &= 0.001\text{m} \\ r &= 0.0005 \end{aligned}$$

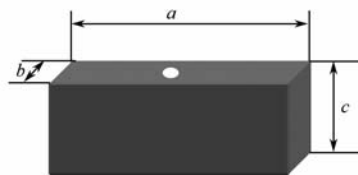
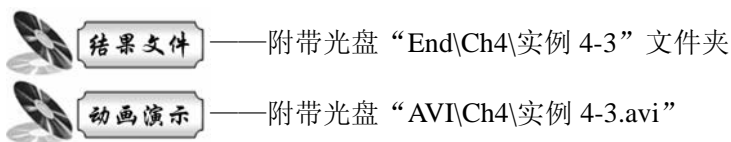


图 4-65 平行板电容



1. GUI 操作

(1) 定义体

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block by ctr, Cornr,Z, 在工作平面的 (0,0) 点建立长、宽、深分别为 0.01,0.001,0.005 的六边形 (图 4-66)。

(2) 移动工作平面

选择路径 Utility Menu→WorkPlane→Offset WP by Increments。Y 和 Z 方向分别平移 0.0005,0.0025, 在 YZ 平面内绕 X 轴旋转 90° (图 4-67)。

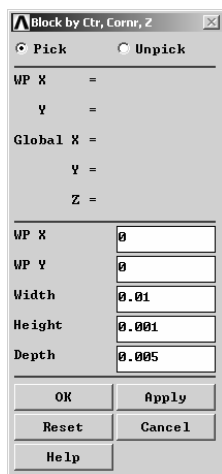


图 4-66 定义体



图 4-67 移动工作平面

(3) 建立面

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→By Dimensions。建立半径为 0.0005 的圆面 (图 4-68)。

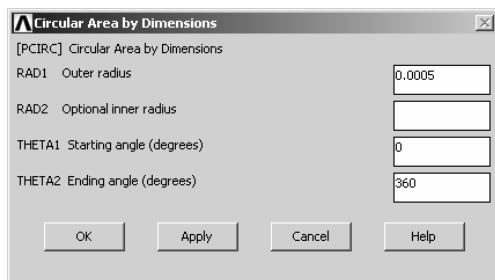


图 4-68 建立圆面

(4) 恢复工作平面到坐标原点

选择路径 Utility Menu→WorkPlane→Align WP with→Global Cartesian, 恢复工作平面到初始位置, 模型如图 4-69 所示。

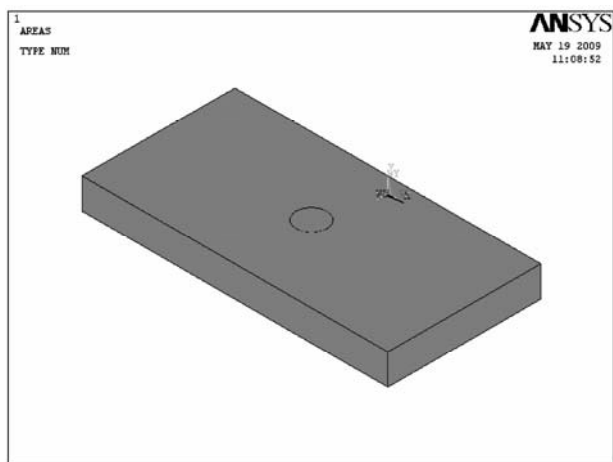


图 4-69 建立好的模型

2. 命令流操作

/PREP7	
BLC5,0,0,0.01,0.001,0.005	! 定义体
WPOFFS,,0.0005,0.0025	! 平移工作平面
WPROTA,,90	! 旋转工作平面
PCIRC,0.0005	! 建立面
WPCSYS,1,0	! 恢复工作平面到坐标原点

4.7 综合实例

实例 4-4 二维螺线管制动器建模

图 4-70 为一个二维螺线管制动器，其几何参数如下：

```

ta=0.75
tb=0.75
tc=0.50
td=0.75
wc=1
hc=2
gap=0.25
space=0.25
ws=wc+2*space
hs=hc+0.75
w=ta+ws+tc
hb=tb+hs
h=hb+gap+td

```

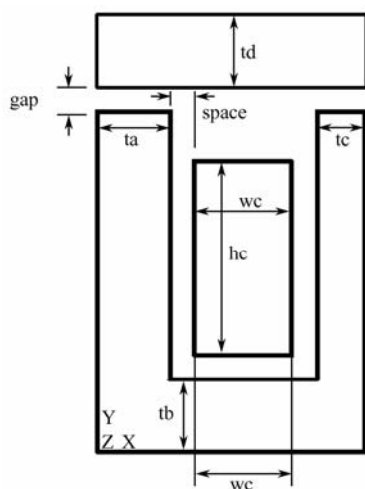


图 4-70 二维螺线管制动器



结果文件

——附带光盘 “End\Ch4\实例 4-4” 文件夹



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch4\实例 4-4.avi”

1. GUI 操作

(1) 显示面编号

选择路径 **Utility Menu**→**PlotCtrls**→**Numbering**，显示面编号（图 4-71）。

(2) 建立模型

首先选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Areas**→**Rectangle**→**By Dimensions**，建立对角线上两点坐标分别为（0,0）和（2.75,0.75）（图 4-72），（0,0.75）和（2.75,3.5），（0.75,0）和（2.25,4.5），以及（1,1）和（2,3）的矩形。

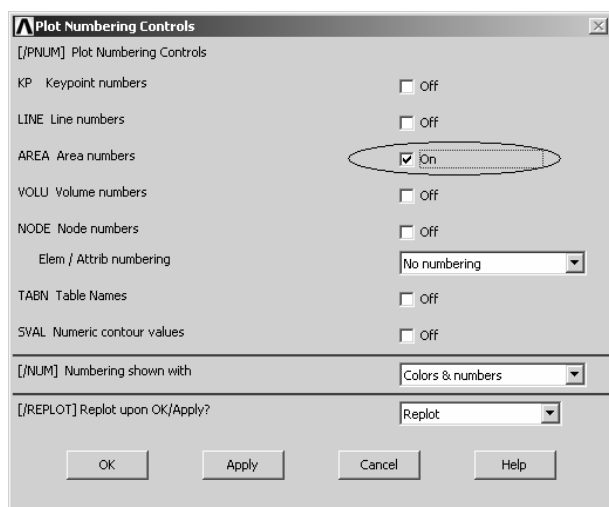


图 4-71 显示面编号

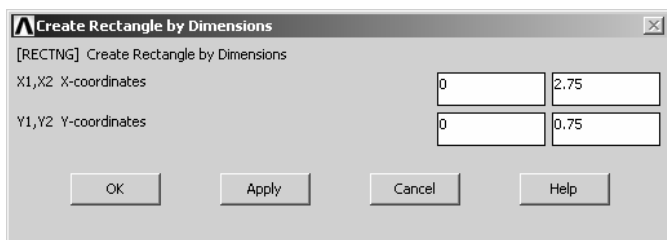


图 4-72 定义矩形

然后选择所有矩形，执行重合操作。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Areas，单击“Pick All”按钮（图 4-73），选择全部面，完成操作。

继续选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，建立对角线上两点坐标分别为（0,0）和（2.75,3.75），（0,0）和（2.75,4.5）的矩形，然后再次选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Areas，单击“Pick All”按钮（图 4-73），选择全部面，完成操作。

（3）显示模型

选择路径 Utility Menu→Plot→Areas，显示建立好的实体模型（图 4-74）。

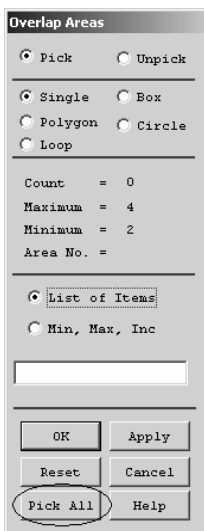


图 4-73 选择所有矩形

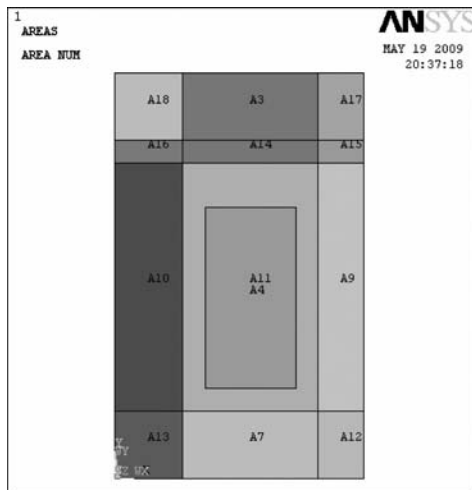


图 4-74 建立好的实体模型

2. 命令流操作

```
/PREP7
```

```
/PNUM,AREA,1
```

! 显示面编号

```
RECTNG,0,2.75,0,0.75
```

! 定义矩形

```
RECTNG,0,2.75,0.75,3.5
```

```
RECTNG,0.75,2.25,0,4.5
```

```
RECTNG,1,2,1,3
```

```

AOVLAP,ALL          ! 重合
RECTNG,0,2.75,0,3.75  ! 定义矩形
RECTNG,0,2.75,0,4.5
AOVLAP,ALL          ! 重合
APLOT

```

实例 4-5 静电驱动梳建模

建立静电驱动梳模型，如图 4-75 所示，几何参数如下：

```

tt = 40 μm
gg = 2 μm
wm = 2 μm
wf = 2 μm
t1 = 4 μm
t2 = 40 μm

```



结果文件

——附带光盘 “End\Ch4\实例 4-5” 文件夹



结果文件

——附带光盘 “AVI\Ch4\实例 4-5.avi”

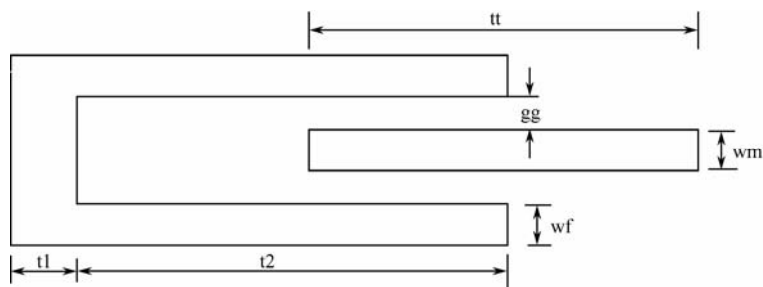


图 4-75 静电驱动梳模型

1. GUI 操作

(1) 定义参数

选择路径 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，定义几何参数如下：

```

WF=2 (图 4-76)
WM=2
GG=2
TT=40
T1=4
T2=TT
HH=10
DT=TT/2
V0=10
XX=(2*TT-DT)*2.75

```



```

Y1=(WM/2)+GG
Y2=(WM/2)+GG+WF
X1=TT+T1
DX=WM*1.1
DY=DX

```

定义完参数后（图 4-77），单击“Accept”按钮确认操作，最后单击“Close”按钮退出。

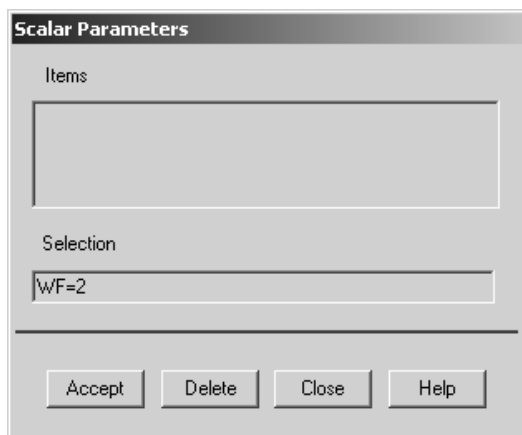


图 4-76 定义参数

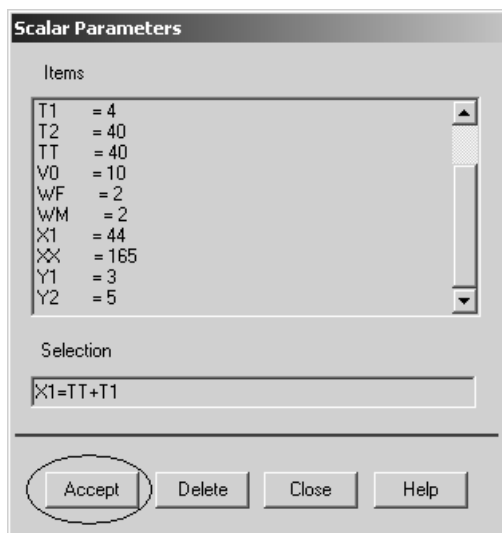


图 4-77 定义完所有参数

（2）建立模型

选择路径 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Volumes → Block → By Dimensions，建立模型。建立 X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2 分别为 -TT,0,Y1,Y2,0,1（图 4-78）和 (-TT -T1), -TT,-Y2,Y2,0,1 和 -DT,(TT-DT),(-WM/2),(WM/2),0,1 和 [-DT-(GG/2)],[TT-DT+(GG/2)], [(-WM/2) - (GG/2)],(WM/2)+(GG/2),0,1 和 -X1-DX,TT+DX,-Y2 -DY,Y2+DY,0,1 的六面体。

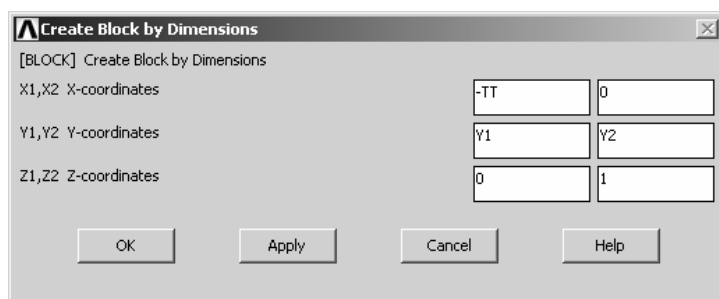


图 4-78 定义矩形

最后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Volumes，采用重合操作连接所有体（图 4-79）。

建立的模型如图 4-80 所示。

2. 命令流操作

```
/PREP7
```

```
WF=2
```

! 定义参数

```
WM=2
```

```
GG=2
```

```
TT=40
```

```
T1=4
```

```
T2=TT
```

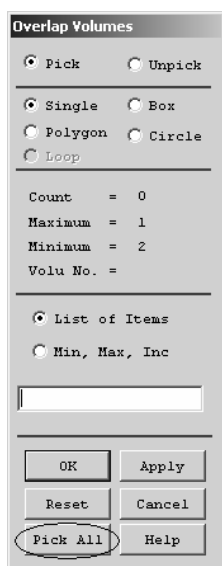


图 4-79 选择所有体

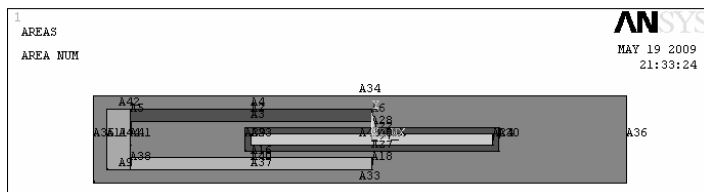


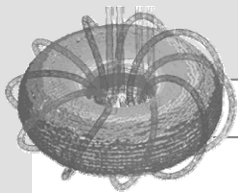
图 4-80 建立的模型

```
HH=10
```

```
DT=TT/2
```

```
V0=10
```

```
XX=(2*TT-DT)*2.75
Y1=(WM/2)+GG
Y2=(WM/2)+GG+WF
X1=TT+T1
BLOCK,-TT,0,Y1,Y2,0,1          ! 建立模型
BLOCK,(-TT-T1),-TT,-Y2,Y2,0,1
BLOCK,-TT,0,-Y1,-Y2,0,1
BLOCK,-DT,(TT-DT),(-WM/2),(WM/2),0,1
BLOCK,(-DT-(GG/2)),(TT-DT+(GG/2)),((-WM/2)-(GG/2)),(WM/2)+(GG/2),0,1
DX=WM*1.1
DY=DX
BLOCK,-X1-DX,TT+DX,-Y2-DY,Y2+DY,0,1
VOVLAP,ALL
```



第5章 网格化有限元模型的建立

单元越小（网络越细）则离散域的近似程度越好，计算结果也越精确，但计算量及误差都将增大，因此，网格划分对有限元求解极其重要。本章介绍网格化有限元模型的建立方法，用节点和单元划分网格的步骤分三步：

- ① 设定单元属性；
- ② 设定网格控制选项；
- ③ 划分网格。



本章内容

- 网格种类
- 设定单元属性
- 网格控制
- 自由网格和映射网格控制
- 划分实体模型
- 划分网格注意事项



本章案例

- 使用 MeshTool 进行网格控制
- 带小孔矩形网格划分控制
- 正五边形网格划分
- 划分铜导体模型网格
- 划分双导线系统网格

5.1 网格种类

在划分网格前，甚至在建立模型前，决定究竟是用自由网格（Free Mesh）还是用映射网格（Mapped Mesh）十分重要。自由网格对单元的形状无限制（图 5-1），映射网格对单元形状和网格类型有限制（图 5-2）。

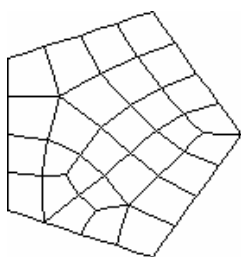


图 5-1 自由网格

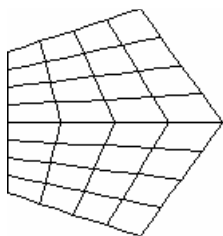


图 5-2 映射网格

映射网格化的面只包含四边形或者三角形单元，映射网格化的体只包含六面体单元。另外，映射网格化的对象典型的拥有规则的形式，具有明显的单元行。

5.2 设定单元属性

设定单元属性是划分网格的第一步，通常，用户需要设定：

- ① 单元类型；
- ② 实常数；
- ③ 裁量属性；
- ④ 单元坐标系。

5.2.1 建立单元属性表

为单元设定属性，用户需要首先建立单元属性表。典型的模型包括单元类型（ET 命令或其对应菜单操作 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete），实常数（R 命令或其对应菜单操作 Main Menu→Preprocessor→Real Constants）和材料属性（MP 命令或其对应菜单操作 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material option）。

5.2.2 赋予单元属性

单元属性表建立后，用户可以通过指向表中的内容来赋予模型不同位置上的不同单元属性。这些指针就是一系列索引号，包括材料编号（MAT），实常数编号（REAL），单元编号（TYPE），单元坐标编号（ESYS）。

第 3 章中已经介绍过使用 TYPE, REAL, MAT 来选择单元属性，这里介绍直接赋予实体模型单元属性的方法。这些操作的命令属于群组命令（XATT），所以只重点介绍一个，其他简要介绍。

1. 设定关键点属性

命令操作：

KATT, MAT, REAL, TYPE, ESYS

设定节点的材料编号（MAT），实常数编号（REAL），单元编号（TYPE），单元坐标编号（ESYS）。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→All Keypoints (图 5-3)

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked KPs

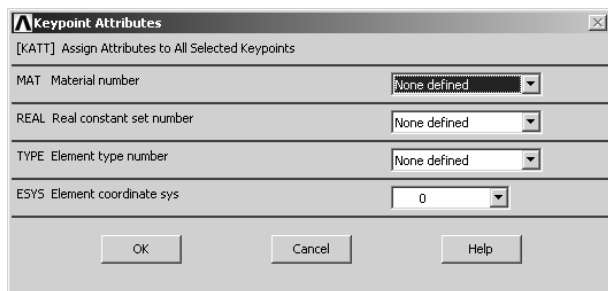


图 5-3 设定关键点属性

2. 设定线属性

命令操作:

LATT

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→All Lines

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Lines

3. 设定面属性

命令操作:

AATT

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→All Areas Main Menu→Preprocessor→
Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas

4. 设定体属性

命令操作:

VATT

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→All Volumes Main Menu→Preprocessor→
Meshing→Mesh Attributes→Picked Volumes

5.3 网格控制

ANSYS 使用的默认网格控制可能对于用户的设计已经足够, 如果这样, 用户不必要再设定任何网格控制。但是, 如果要使用网格控制, 用户必须在网格化实体模型前设定。

网格控制可以设定单元形状、中间节点位置和网格化实体模型的单元大小。这一步是

有限元分析最重要的步骤之一，因为这一步的精确与否严重影响到整个分析的正确性和经济性。这一步最主要的就是定义单元的大小和数目。网格太细也许会有比较好的精确性，但是因为网格太密太细，会占用大量的系统资源和分析时间，而精确性没有显著提高，所以网格并非越密越好，要根据实际情况来设定参数。

5.3.1 单元形状

首先，用户需要设定网格形状。例如，面单元既可以网格化为四边形，也可以网格化为三角形。

第 2 章已经介绍过使用 MSHAPE 及其对应菜单操作来控制单元形状的方法，这里介绍使用 ANSYS 推荐的“MeshTool”网格化工具来进行单元形状的控制。

为了提高效率，ANSYS 推荐用户使用“MeshTool”来设定单元形状（图 5-4）。其菜单路径为 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool，使用“MeshTool”，用户只需要单击想要的单元形状即可。在这里，用户还可以设定其他选项，如网格类型等。

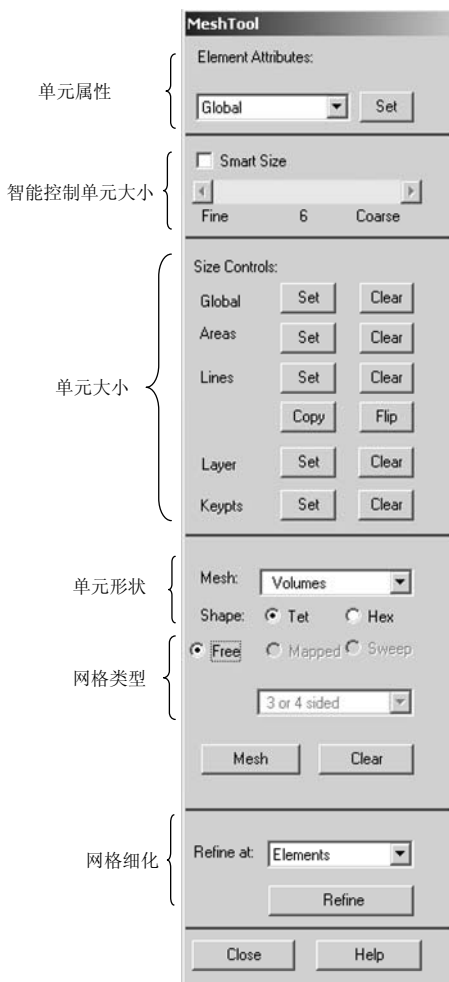


图 5-4 网格化控制

在单元形状区，用户可以选择划分网格的单元维度（图 5-5），然后选择单元形状（图 5-6），例如，二维的面即可选择三角形（Tri）或者四边形（Quad）。

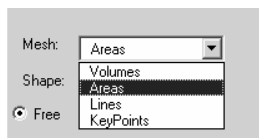


图 5-5 单元维度



图 5-6 选择单元形状

5.3.2 选择网格类型

第 2 章介绍过使用 MSHKEY 命令选择自由网格还是映射网格的方法，这里同样介绍使用“MeshTool”来选择网格类型。在网格类型区，用户可以选择使用自由网格还是映射网格（图 5-7）。

实例 5-1 使用“MeshTool”进行网格控制

使用“MeshTool”对一环形模型进行网格划分控制（图 5-8）。



图 5-7 选择网格类型

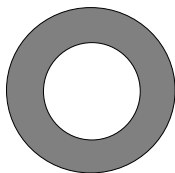


图 5-8 环形模型

**结果文件**

——附带光盘“End\Ch5\实例 5-1”文件夹

**动画演示**

——附带光盘“AVI\Ch5\实例 5-1.avi”

操作方法如下：

（1）建立模型

建立内径为 1，外径为 1.5 的圆环，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→By Dimensions（图 5-9）。

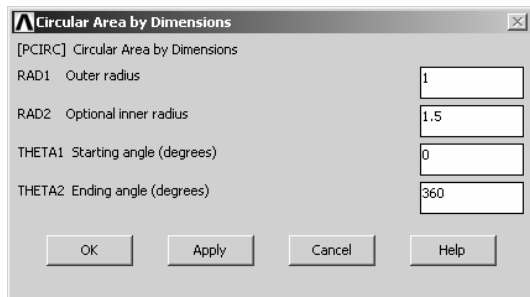


图 5-9 建立圆环

然后选择 PLANE13 单元。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete（图 5-10），单击“Add...”按钮添加单元，选择单元“PLANE13”（图 5-11）。

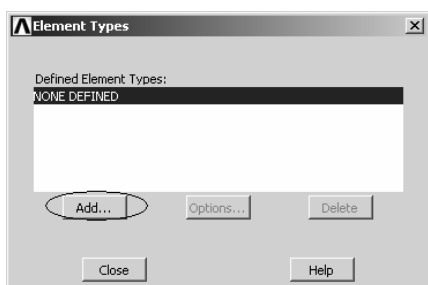


图 5-10 定义单元

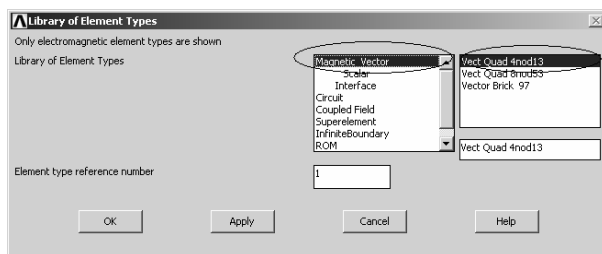


图 5-11 选择单元“PLANE13”

建立的模型如图 5-12 所示。

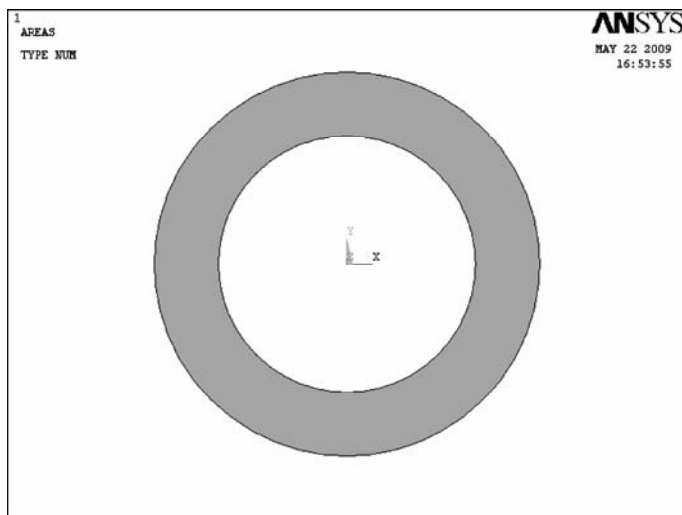


图 5-12 建立的模型

(2) 使用“MeshTool”进行网格控制

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool，打开“MeshTool”，分别设定各个选项。首先单元属性选择“Areas”（图 5-13）。

然后选择“Smart Size”（图 5-14），开启智能网格大小控制。

再选择“Areas”，形状选择“Tri”三角形，“Free”自由网格。单击“Mesh”按钮划分网格（图 5-15）。

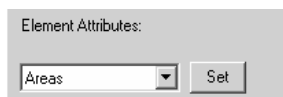


图 5-13 单元属性

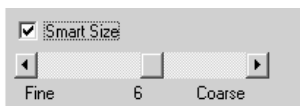


图 5-14 选择“Smart Size”

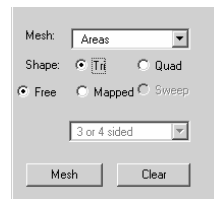


图 5-15 选择网格形状和类型

划分完网格的模型如图 5-16 所示。

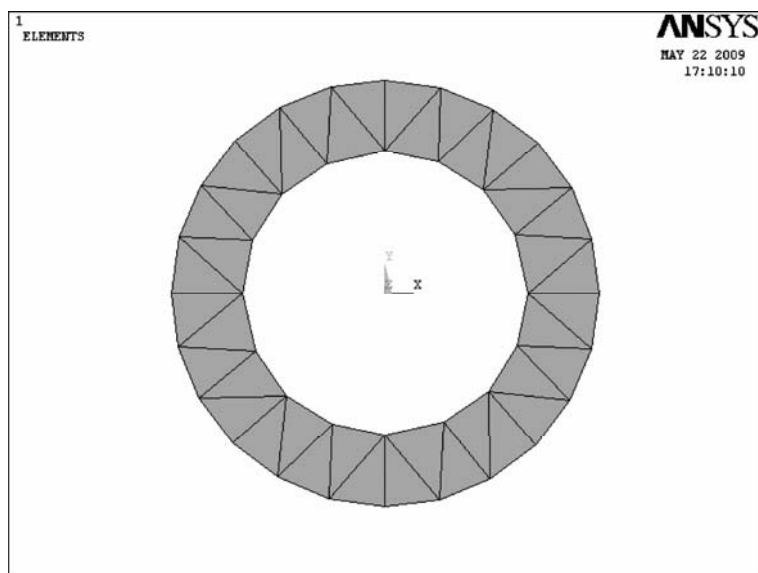


图 5-16 划分完网格的模型

5.3.3 自由网格单元大小高级设置方法

第 2 章介绍过使用 **SMRTSIZE** 及其对应菜单操作来控制单元大小的基本方法，即用户只需设定从 1（细网格）~10（粗网格）的整数来控制网格大小。

但是有时候，用户倾向于使用高级方法，这样可以手动设定各个控制项，改进网格以更适应用户需要。用户可以改变一些设置，例如，小孔和小角度粗化关键字，以及网格扩张和变化因子（详见 **SMRTSIZE** 命令）。另外，用户可以用 **SEIZE** 为智能单元大小控制设定初始单元大小。

结合例子，这里详解 **SMRTSIZE** 高级设置。

SMRTSIZE, SIZLVL, FAC, EXPND, TRANS, ANGL, ANGH, GRATIO, SMHLC, SMANC, MXI TR, SPRX

SIZLVL: 整体单元大小。有效输入如下所述。

n: 激活 **SmartSizing**，设定大小级别为 **n**，必须是从 1（细网格）~10（粗网格）的整数。

STAT: 列出当前 **SMRTSIZE** 设置。

DEFA: 设定所有 **SMRTSIZE** 设置为默认值。

OFF: 关闭 **SmartSizing**。



如果使用了 **SIZLVL**，则后面所有输入都忽略。

没有采用 **SMRTSIZE** 的网格如图 5-17 所示，使用“**SMRTSIZE,6**”后，效果如图 5-18 所示。

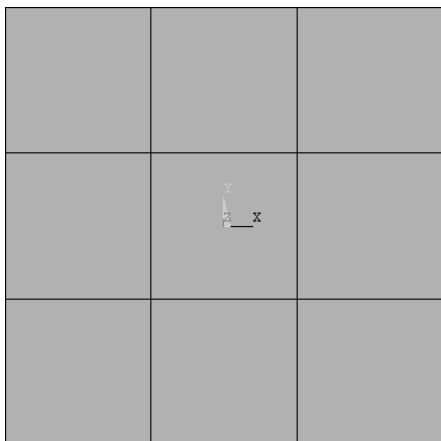


图 5-17 没有使用 SMRTSIZE

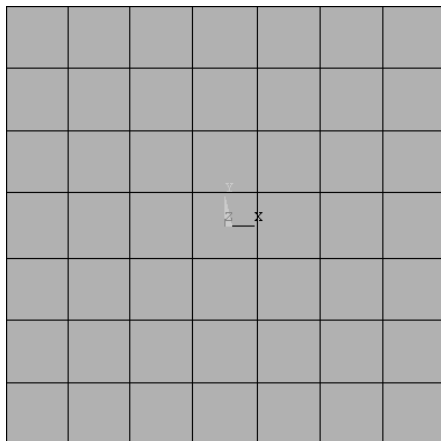


图 5-18 使用“SMRTSIZE,6”

FAC: 计算的默认网格大小缩放因子。使用“SMRTSIZE,,0.5”的效果如图 5-19 所示。

EXPND: 网格扩张（或缩减）因子，它用来设定一个面相对于边界单元大小的内部单元的大小。例如，划分网格前设定“SMRTSIZE,,,2”（图 5-20）会使内部单元大约是边界单元大小的两倍。如果 EXPND 小于 1，则内部单元比外部单元小。EXPND 必须介于 0.5 和 4 之间。内部单元实际大小也取决于 TRANS 项或者 AESIZE 和 ESIZE（如果使用）。

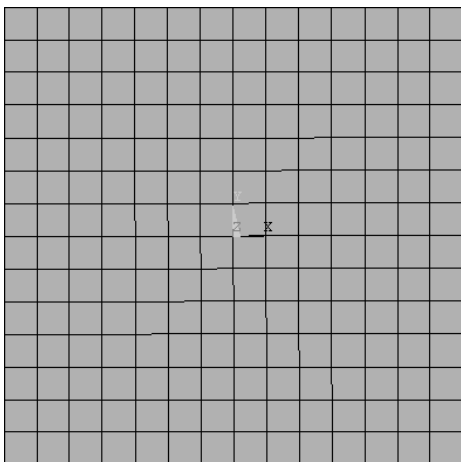


图 5-19 使用“SMRTSIZE,,0.5”

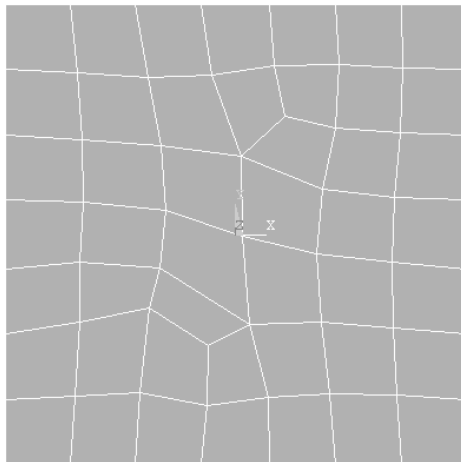


图 5-20 设定“SMRTSIZE,,,2”

TRANS: 网格渐变因子（此因子与 MOPT,TRANS,Value 命令相同），用来控制单元从边界到中间区域大小变化的快慢。如果为 0.5，则表示单元从外向内，内侧单元大约是其相邻单元大小的二分之一（图 5-21）。内部单元实际大小也取决于 EXPND 项或者 AESIZE 和 ESIZE。

ANGL: 曲线情况下每个低阶单元最大跨角。

例如，一个圆形模型（图 5-22），没有使用 SMRTSIZE 划分的网格如图 5-23 所示，使用“SMRTSIZE,,,,,22.5”后划分的网格如图 5-24 所示。

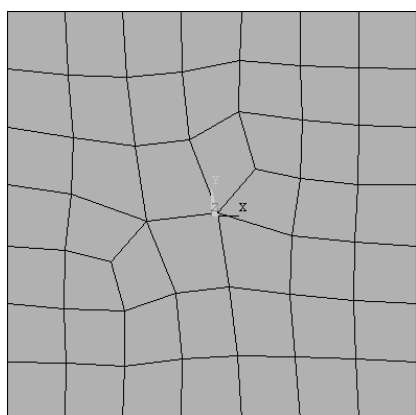


图 5-21 设定“SMRTSIZE,,,0.5,0.5”

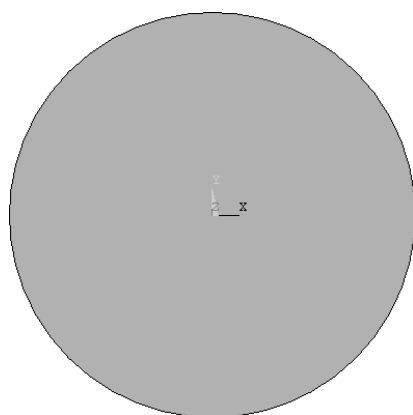


图 5-22 圆形模型

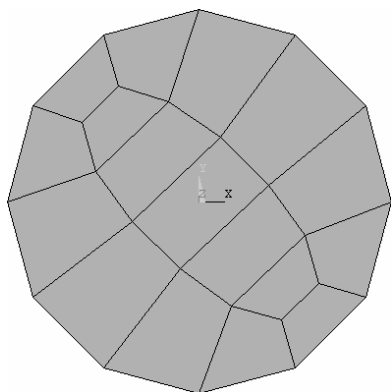


图 5-23 没有使用 SMRTSIZE 划分网格

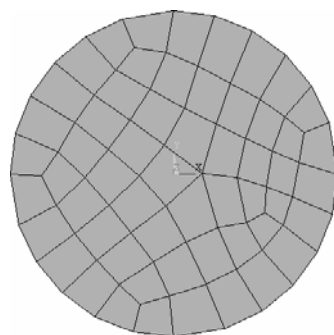


图 5-24 使用“SMRTSIZE,,,,,22.5”后划分的网格

SMHLC: 小孔粗化关键字, 可以为 ON 或 OFF。如果为 ON, 则抑制可以导致很小单元边界的曲率细化 (例如, 围绕小孔的细化)。

没有使用 **SMRTSIZE** 的中间带空模型划分网格, 结果如图 5-25 所示, 使用 **SMRTSIZE E,,,,,,OFF** 的网格划分结果如图 5-26 所示, 使用 **SMRTSIZE,,,,,,ON** 的网格划分结果如图 5-27 所示。

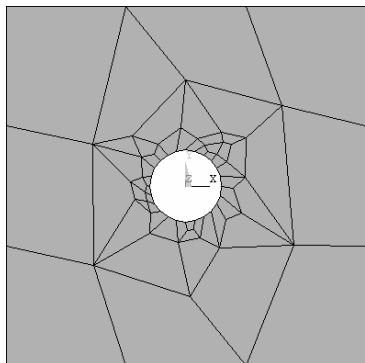


图 5-25 没有使用 SMRTSIZE 的中间带空模型划分网格

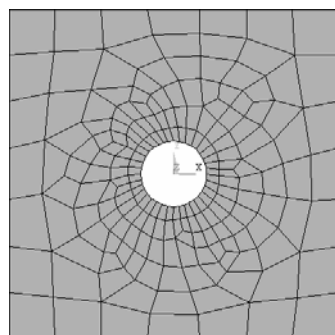


图 5-26 使用“SMRTSIZE,,,,,,OFF”的网格划分结果

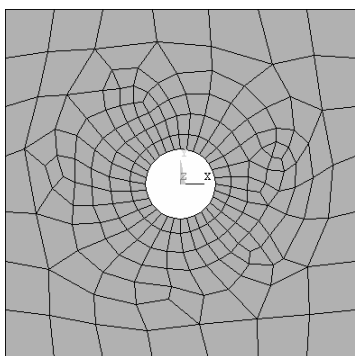


图 5-27 使用“SMRTSIZE,,,,,,,,ON”的网格划分结果

SMANC: 小角度粗化关键字, 可以为 ON 或 OFF。如果为 ON, 则限制在小角度区域的近似细化。

没有使用 SMRTSIZE 的小角度模型划分网格如图 5-28 所示, 使用“SMRTSIZE,,,,,,,,OFF”的网格划分结果如图 5-29 所示, 使用“SMRTSIZE,,,,,,,,ON”的网格划分结果如图 5-30 所示。



图 5-28 没有使用 SMRTSIZE 的小角度模型划分网格



图 5-29 使用“SMRTSIZE,,,,,,,,OFF”的网格划分结果



图 5-30 使用“SMRTSIZE,,,,,,,,ON”的网格划分结果

5.3.4 映射网格默认单元大小

DESIZE 命令及其对应菜单操作可以改变默认设置, 如连接在线上的最小和最大单元数。它常被用来控制映射网格单元大小, 虽然它也可以用来设定自由网格的默认值 (如果 SmartSizing 被关闭, 即“SMRTSIZE,OFF”), 但是推荐使用 SMRTSIZE 来完成此操作。即使 SmartSizing 处于打开状态, 有些 DESIZE 设置, 例如, 连接在线上的最小和最大单元数, 仍然可以影响自由网格密度。DESIZE 的默认设置只有在没有其他大小控制命令如 KESIZE, LESIZE, ESIZE 的情况下才有效。

命令操作:

DESIZE

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Other (图 5-31)

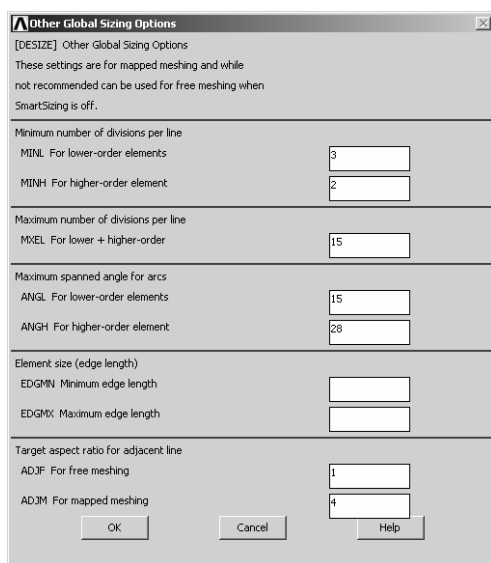


图 5-31 映射网格默认单元大小

例如，图 5-32 所示为程序默认的映射网格划分，图 5-33 所示为用 **DESIZE** 改变最小单元数和最大跨角后的网格划分。

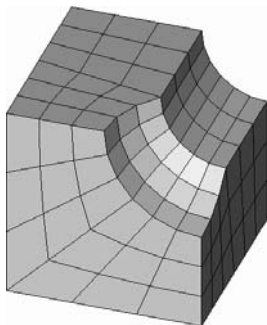
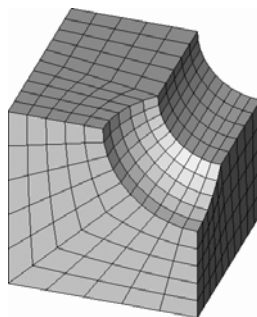


图 5-32 程序默认的映射网格划分

图 5-33 用 **DESIZE** 改变最小单元数和最大跨角后的网格划分

对于大型模型，预览 **DESIZE** 设定的默认网格是明智的。这可以使用线显示功能实现，其步骤如下：

- ① 建立模型；
- ② 选择单元类型；
- ③ 选择允许的单元形状；
- ④ 选择网格种类；
- ⑤ 使用 **LESIZE, ALL** 命令；
- ⑥ 显示线。

实例 5-2 带小孔矩形网格划分控制

对于一个带小孔矩形（图5-34），设定其默认网格控制，预览改变前后情况。

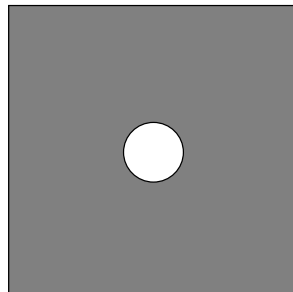
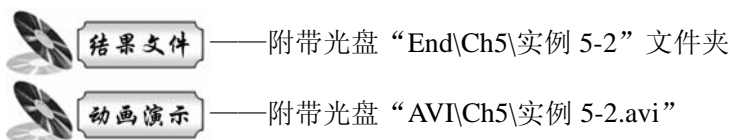


图 5-34 带小孔矩形



1. GUI 操作

(1) 建立模型

首先, 设定单元属性, 选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/ Edit/Delete, 选择单元 PLANE42 (图 5-35), 单击 “OK” 按钮确认。

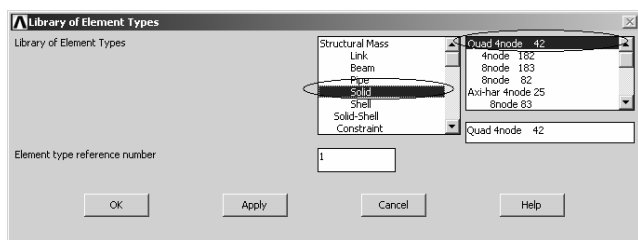


图 5-35 选择单元 PLANE42

然后建立矩形, 选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions, X 和 Y 范围都是 -0.5~0.5 (图 5-36), 单击 “OK” 按钮确认。

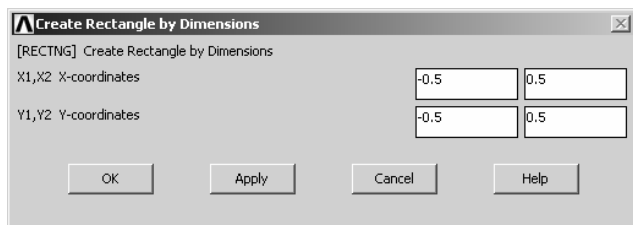


图 5-36 建立矩形

再建立圆形, 选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→By Dimensions, 建立半径为 0.1 的圆形 (图 5-37)。

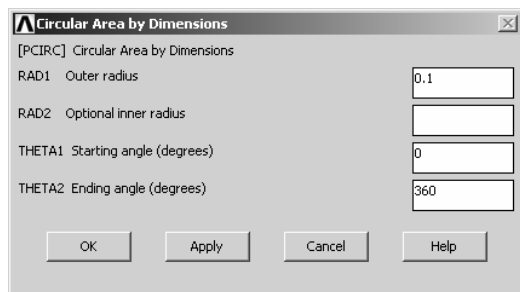


图 5-37 建立圆形

最后采用布尔操作, 产生带小孔的矩形。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→Areas, 在输入框中先输入 “1”, 单击 “OK” 按钮确认, 再输入 “2”, 则产生带小孔的矩形 (图 5-38)。

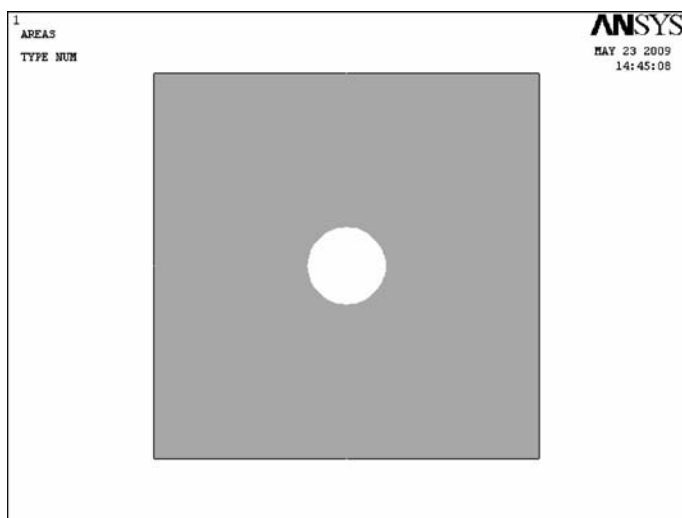


图 5-38 带小孔的矩形

(2) 网格设置

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool，在单元形状区选择“Areas”，形状选择“Quad”四边形，“Mapped”映射网格（图 5-39）。单击“Close”按钮关闭。

(3) 保存以恢复

单击“SAVE_DB”按钮保存数据（图 5-40）。

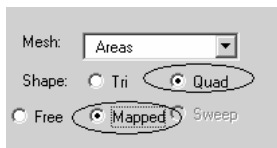


图 5-39 网格设置

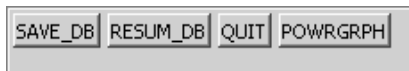


图 5-40 保存

(4) 根据默认设置划分线段

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→All Lines，不添加或修改任何设置，单击“OK”按钮确认（图 5-41）。然后出现图 5-42 图形。

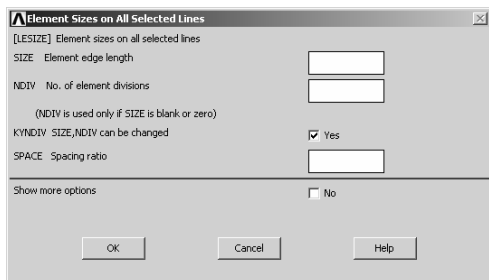


图 5-41 根据默认设置划分线段

(5) 恢复

单击“RESUM_DB”按钮恢复（图 5-43）。

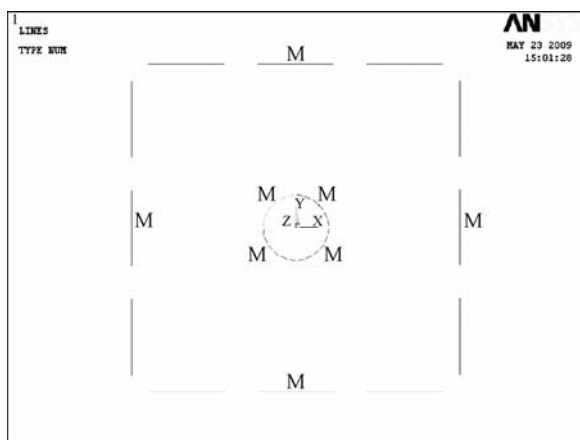


图 5-42 划分的线段

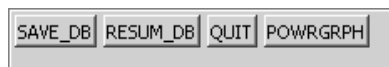


图 5-43 恢复

(6) 改变默认设置

选择路径 Main Menu → Preprocessor → Meshing → Size Cntrls → ManualSize → Global → Other, 在 MINL, MXEL 和 ANGL 中分别填入“10”“30”和“15”, 单击“OK”按钮确认 (图 5-44)。

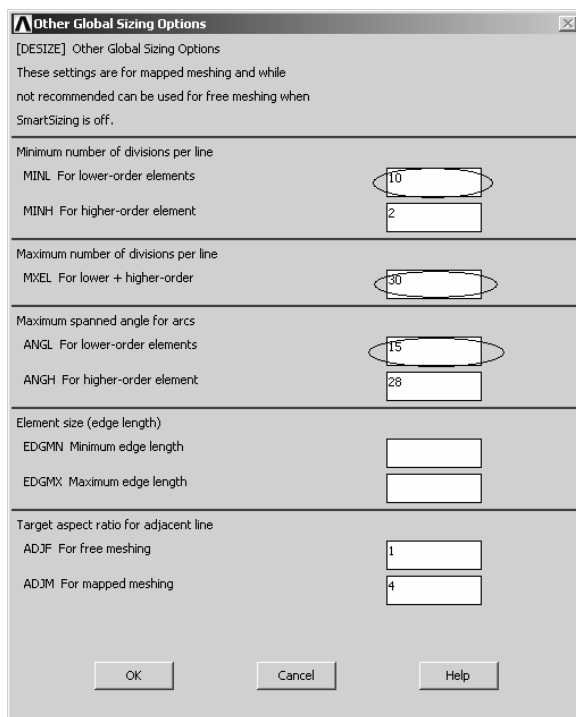


图 5-44 改变默认设置

(7) 根据改变的默认设置改变线段划分

选择路径 Main Menu → Preprocessor → Meshing → Size Cntrls → ManualSize → Lines → All Lines, 不添加或修改任何设置, 单击“OK”按钮确认 (图 5-45)。然后出现图 5-46 图形。

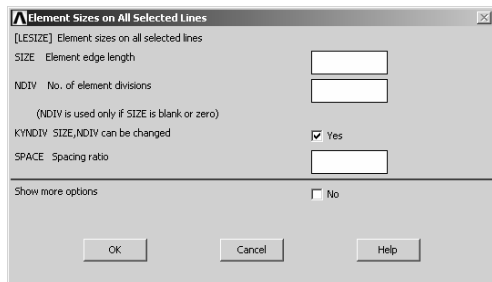


图 5-45 根据默认设置划分线段

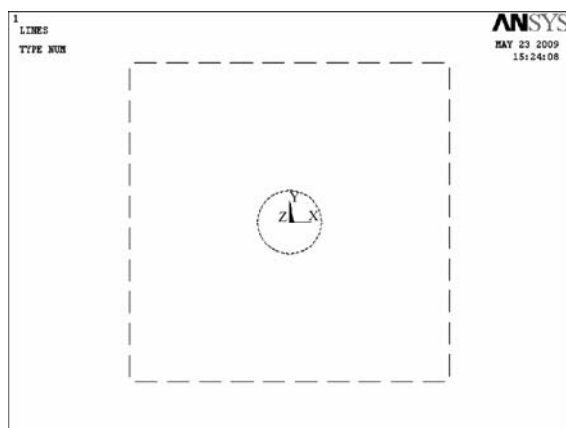


图 5-46 划分的线段

2. 命令流操作

ET,1,PLANE42	! 设定单元类型
RECTNG,-0.5,0.5,-0.5,0.5	! 建立模型
PCIRC,0.1	
ASBA,1,2	
MSHAPE,0	! 设定网格形状
MSHKEY,1	! 设定网格类型
SAVE	! 保存以恢复
LESIZE,ALL	! 根据默认设置划分线段
LPLOT	! 显示
RESUME	
DESIZE,10,,30,15	! 改变默认设置
LESIZE,ALL,,,,,1	! 根据改变的默认设置改变线段划分
LPLOT	! 显示

5.3.5 局部网格控制

许多情况下，因为结构物理条件的原因，由默认单元大小产生的网格不很适合。用户可以使用下列方法进行更多控制。

根据单元边长或者线上单元数目来控制全局单元大小，其方法如下所述。

命令操作：

ESIZE, SIZE, NDIV

SIZE: 单元边长。

NDIV: 线上单元数目。

菜单操作（图 5-47）：

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Global→Size

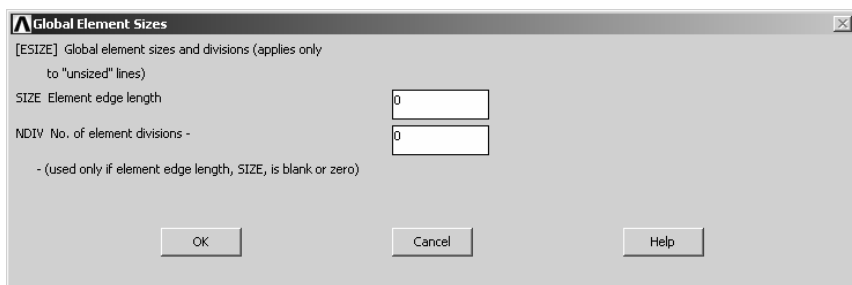


图 5-47 ESIZE

控制关键点旁边的单元大小的方法如下所述。

命令操作：

KESIZE, NPT, SIZE, FACT1, FACT2

NPT: 关键点编号。

SIZE: 单元长度。

菜单操作 (图 5-48):

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrl→ManualSize→Keypoints→All KPs

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrl→ManualSize→Keypoints→Clr Size

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrl→ManualSize→Keypoints→Picked KPs

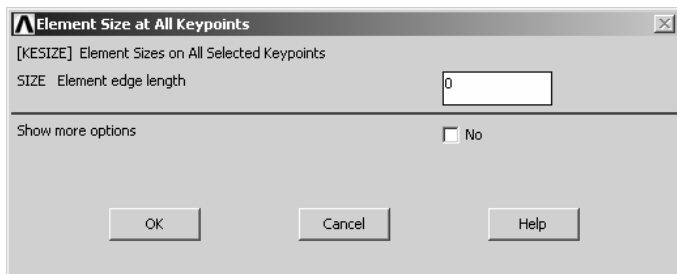


图 5-48 KESIZE

控制线上单元大小的方法如下：

命令操作：

LESIZE, NL1, SIZE, ANGSIZ, NDIV, SPACE, KFORC, LAYER1, LAYER2, KYNDIV

NL1: 线编号。

SIZE: 单元边长。

NDIV: 线上单元数目。

菜单操作 (图 5-49):

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrl→Lines→All Lines Main Menu→Preprocessor→

Meshing→Size Cntrl→Lines→Picked Lines Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrl→

Lines→Clr Size

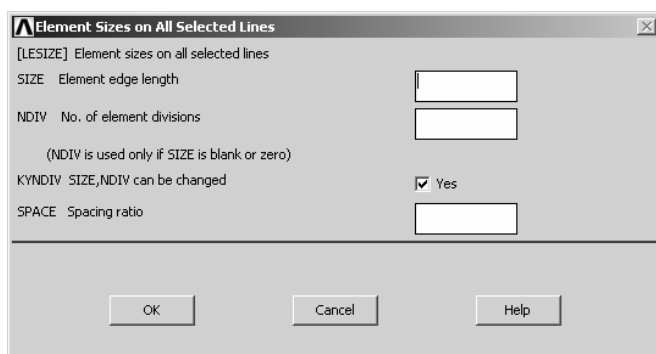


图 5-49 LESIZE

5.3.6 内部网格控制

之前已把注意力放在边界上的网格大小控制，不过，ANSYS 也可以控制没有线段的面的内部的网格大小。可以采用的操作如下所述。

命令操作：

MOPT, Lab, Value

菜单路径：

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesher Opts（图 5-50）

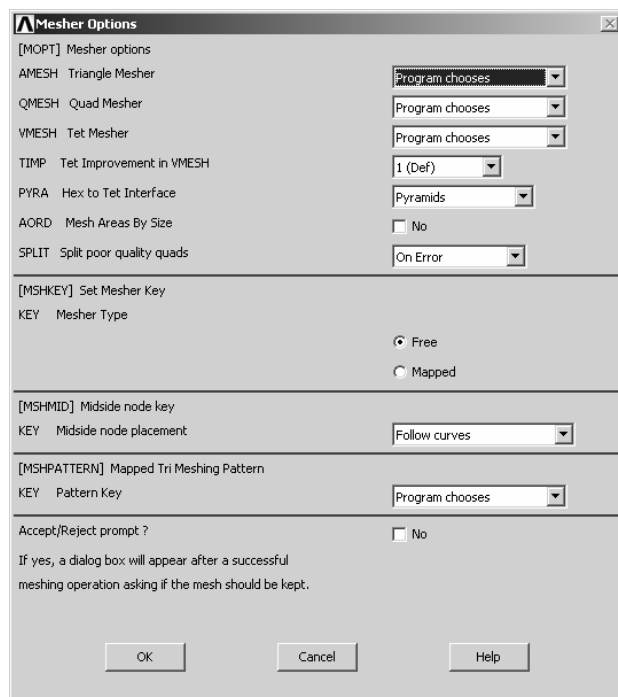


图 5-50 MOPT

5.3.7 网格控制优先级

上述方法可以综合运用。但是如果使用上述多种控制方法出现冲突，确定的优先级必须遵守。

优先级从高到低如下：

LESIZE→KESIZE→ESIZE→DESIZE 或 SMARTSIZE。

5.4 自由网格和映射网格控制

对于自由网格划分，其实体模型没有任何要求。

单元形状取决于用户是划分面还是体。对于面，自由网格划分可能只包含四边形、三角形或是其组合。对于体，自由网格划分一般只有六面体。金字塔形单元也可能由于网格渐变的原因引入六面体网格划分。

如果选择的单元类型只允许三角形或者六面体，程序将只选用此种形状。但是，如果允许用户选择（如 PLANE82 或者 SOLID95），则可以用 MSHAPE 或其对应菜单操作 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesher Opts。

用户可以选择全部使用四边形或三角形的面单元，或全部使用六面体的体单元产生映射网格。映射网格需要面或者体形状规则，即其必须符合一定标准。



有硬点时不能使用映射网格划分。

自由网格划分比较简单，这里重点介绍映射网格划分。

5.4.1 面的映射网格划分

为了使用映射网格划分，面必须满足以下条件：

- ① 该面必须是三角形或四边形；
- ② 面的对边必须划分为相同数目的单元，或者其划分与一个网格渐变相匹配；
- ③ 如果是三角形，则单元必须为偶数且各边数目相等。

1. 线划分

面的对边必须划分为相同数目的单元，或者其划分与一个网格渐变相匹配，但是用户不必指定每条线的划分。一旦用户指定使用映射网格划分（MSHKEY,1），则程序会将线划分转移到对边的线上。而且，前述的优先级这里也适用，即转移的线划分 LESIZE 将会覆盖 ESIZE 指定的线划分（图 5-51）。

2. 线连接

如果面由多于四条的边围绕，则可以联合（LCOMB）或连接（LCCAT）线以将边减少到四条。当 LCOMB 允许使用时（此时线相切，且连接在同一面上），最好不要用 LCCAT。不过

LCOMB 也可以用于非相切线，但是在线的断点不一定会产生节点。

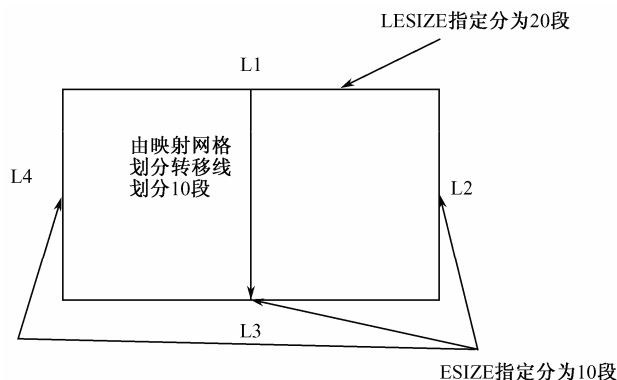


图 5-51 转移的线划分 LESIZE 将会覆盖 ESIZE 指定的线划分

联合方法如下所述。

命令操作：

LCOMB, NL1, NL2, KEEP

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Lines (图 5-52)

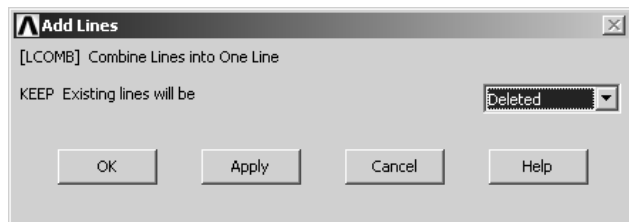


图 5-52 联合

连接方法如下所述。

命令操作：

LCCAT, NL1, NL2

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→Concatenate→Lines

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Mapped→Concatenate→Lines

采用 LCOMB 和 LCCAT (图 5-53) 划分的网格效果如图 5-54 所示。

3. 简化的面映射网格划分

AMAP 命令及其对应 GUI 操作 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→By Corners 提供最简单的获得映射网格的方法。此操作使用指定的关键点为角点，然后连接这些关键点之间所有的线。面会自动划分为全部四边形或三角形的单元（不需要 MSHKEY 来指定）。在此操作之前不需要进行线连接，因为它是内在自动进行的。

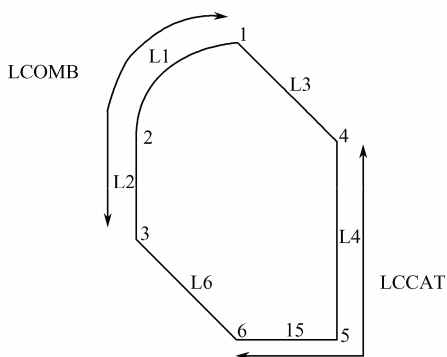


图 5-53 使用 LCCOMB 和 LCCAT

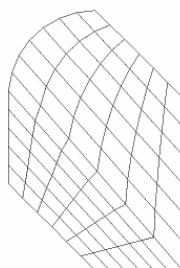


图 5-54 使用 LCCOMB 和 LCCAT 后划分的网格

命令操作:

AMAP, AREA, KP1, KP2, KP3, KP4

AREA: 要划分网格的面编号，一次只能划分一个面。

KP1,KP2,KP3,KP4: 定义网格角的关键点（因为此时将多边形考虑成为四边形）。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→By Corners

如果选择关键点 1,4,3,6（图 5-55），则划分网格的效果如图 5-54 所示。

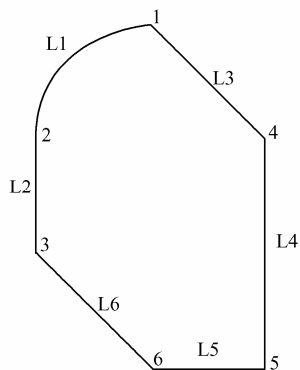


图 5-55 简化的面映射网格划分

4. 四边形渐变映射网格大小

另外一种产生映射网格的方法是指定一个面的对边的线段数目，以使划分的数目允许四边形网格渐变（图 5-56）。

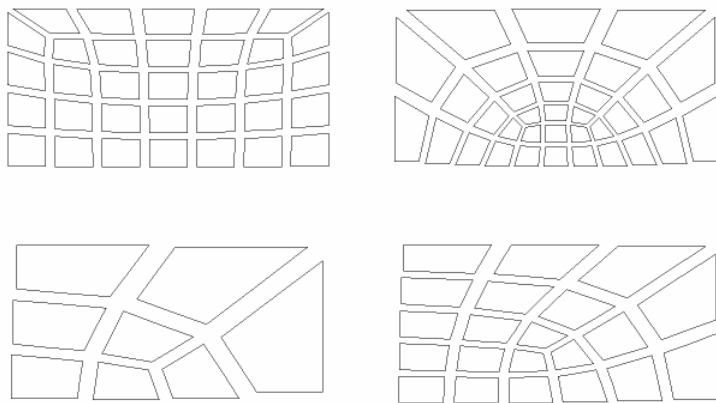


图 5-56 四边形渐变映射网格

若对四边形设置渐变网格（图 5-57），可以采用以下操作：

```
ESIZE,,5
LESIZE,2,,,10
LESIZE,4,,,20
AMESH,ALL
```

则划分完成的网格如图 5-58 所示。

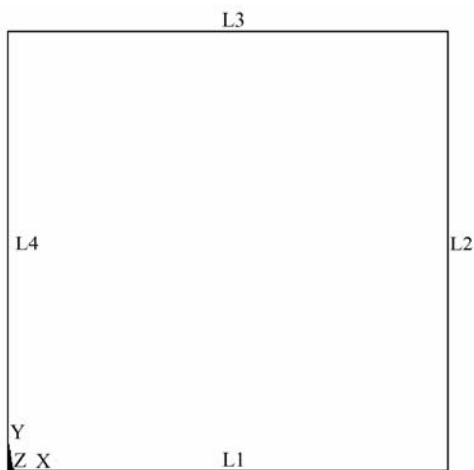


图 5-57 四边形模型

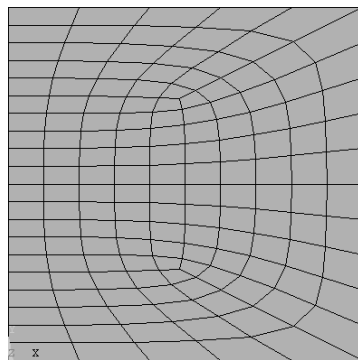


图 5-58 划分完成的网格

5. 三角形渐变映射网格大小

产生映射网络的方法也可以采用三角形渐变映射网格大小的方式。

四边形渐变映射网格大小和三角形渐变映射网格大小关系如图 5-59 所示。图 5-59 (b) 显示三角形渐变映射网格。用户指定使用三角形网格时，ANSYS 其实是先用四边形网格划分单元，然后再将其分割成三角形单元。图 5-59 (a) 就是作为三角形网格基础的四边形网格。图 5-59 (c) 显示附加有四边形单元的三角形网格。

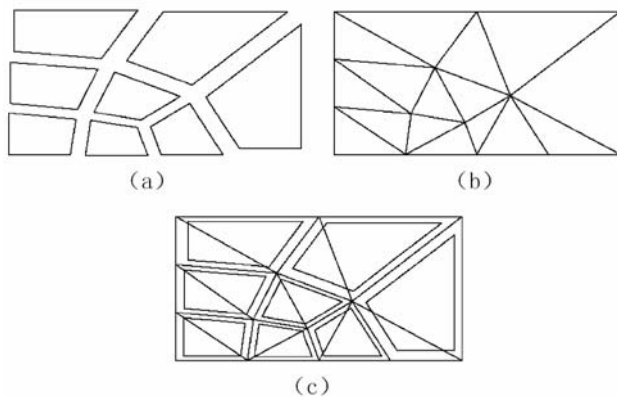


图 5-59 四边形渐变映射网格大小和三角形渐变映射网格大小关系

5.4.2 体的映射网格划分

为了用六边形划分单元，以下条件必须满足：

- ① 体必须是砖形（六面体）、楔形或者棱柱（五面体）、四面体；
- ② 体的对面必须有相同数目的单元划分（图 5-60），或者其划分与一个网格渐变相匹配；
- ③ 如果体是棱柱或者四面体，则其三角形面的单元划分数目必须是偶数（图 5-61，图 5-62）。

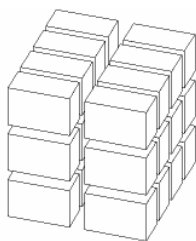


图 5-60 体的对面必须有相同数目的单元划分

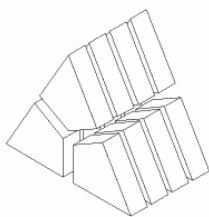


图 5-61 棱柱的三角形面的单元划分数目必须是偶数

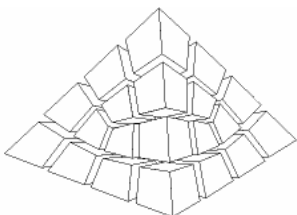


图 5-62 四面体的三角形面的单元划分数目必须是偶数

实例 5-3 正五边形网格划分

对一个正五边形模型进行渐变网格划分（图 5-63）。



结果文件

——附带光盘“End\Ch5\实例 5-3”文件夹



动画演示

——附带光盘“AVI\Ch5\实例 5-3.avi”

1. GUI 操作

（1）建立模型

首先选择 PLANE13 单元。选择路径 Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete（图 5-64），单击“Add...”按钮添加单元，选择单元“PLANE13”（图 5-65）。

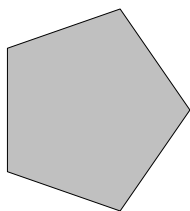


图 5-63 正五边形



图 5-64 定义单元

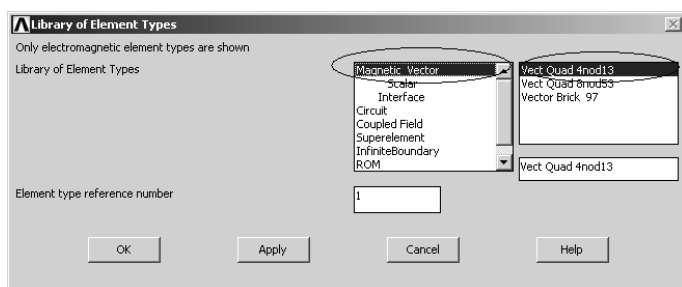


图 5-65 选择单元“PLANE13”

然后建立模型，选择路径 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Polygon → By Side Length，建立正五边形，在 NSIDES 框中输入“5”，在 LSIDE 框中输入“1”（图 5-66）。

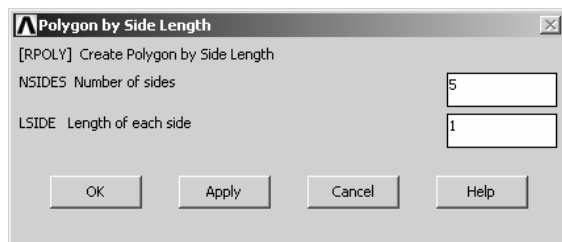


图 5-66 建立正五边形

(2) 连接线

选择路径 Main Menu → Preprocessor → Meshing → Mesh → Areas → Mapped → Concatenate → Line，连接线 1 和 5（图 5-67）。

连接线后的效果如图 5-68 所示。

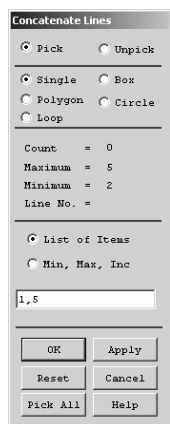


图 5-67 连接线 1 和 5

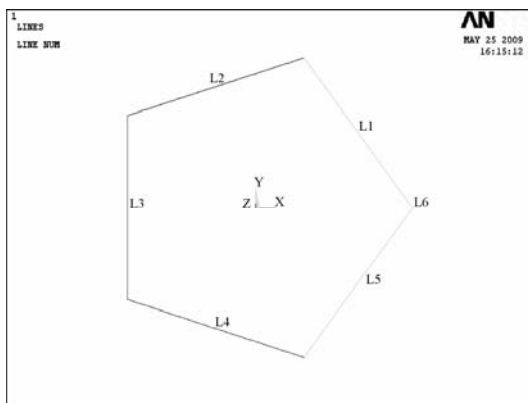


图 5-68 连接线后的效果

(3) 设置单元

首先，设置默认线段划分数目。选择路径 Main Menu → Preprocessor → Meshing → Size Cntrls → ManualSize → Global → Size，NDIV 中输入“5”（图 5-69）。

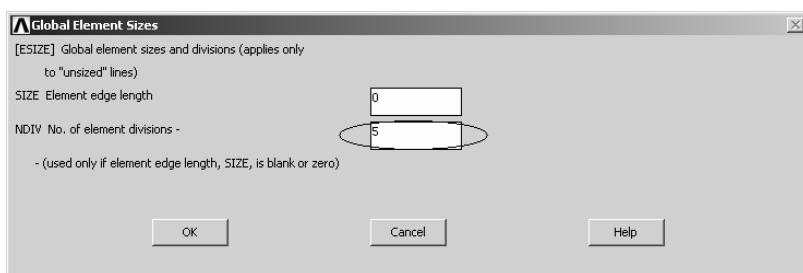


图 5-69 设置默认线段划分数目

(4) 划分网格

然后，选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**MeshTool**，打开“MeshTool”，分别设定各个选项。首先单元属性选择“Areas”（图 5-70）。

再单击“Line”后的“Set”按钮，设定对边线划分数目（图 5-71）。



图 5-70 单元属性



图 5-71 设定对边线划分数目

其中线 2 划分为 10 段（图 5-72）。

然后选择映射网格，四边形网格，单击“Mesh”按钮划分网格（图 5-73）。划分后效果如图 5-74 所示。

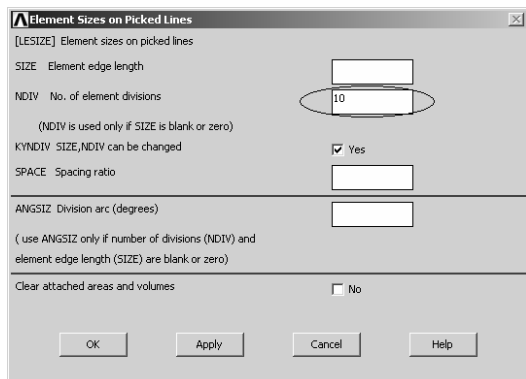


图 5-72 线 2 划分为 10 段



图 5-73 划分网格

2. 命令流操作

```

/PREP7
ET,1,PLANE13          ! 建立模型
RPOLY,5,1
LCCAT,1,5             ! 连接线
MSHKEY,1              ! 单元类型

```

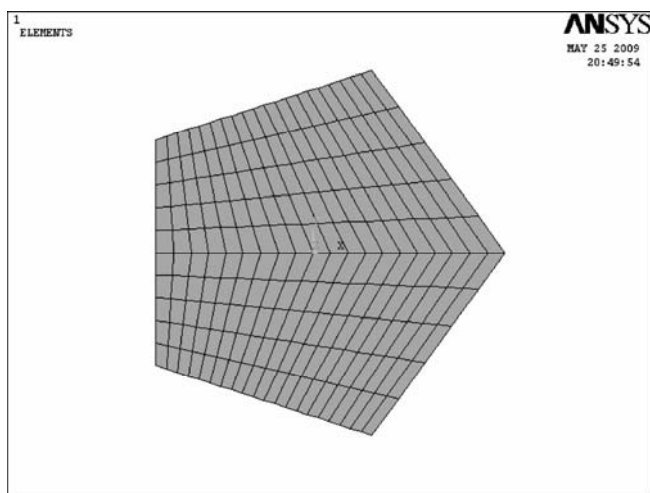


图 5-74 划分后效果

MSHAPE,0,2D	! 单元形状
ESIZE,,5	! 设定默认线段划分数目
LESIZE,2,,,10	! 设定对边线段划分数目
AMESH,1	! 划分网格

5.5 划分实体模型

一旦建立好实体模型，设置好单元属性和网格控制选项，就可以开始划分网格了。但是，划分网格前用 **SAVE** 命令或对应菜单操作 **Utility Menu**→**File**→**Save as Jobname.db** 保存模型是一个好的习惯。

网格划分使用群组操作 **XMESH** 及其对应菜单操作。

5.5.1 产生点单元

命令操作：

```
KMESH, NP1, NP2, NINC
```

菜单操作：

```
Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Keypoints
```

5.5.2 产生线单元

命令操作：

```
LMESH, NL1, NL2, NINC
```

菜单操作：

```
Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines
```

5.5.3 产生面单元

命令操作:

AMESH, NA1, NA2, NINC

AMAP, AREA, KP1, KP2, KP3, KP4

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided Main Menu→
Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Free Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→
Target Surf Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→By Corners

如果同时划分多个面, 最好采用“MOPT,ORDER,ON”命令先划分面积最小的面的单元。这样可以保证在小面积区域, 网格足够密且网格质量足够高。

5.5.4 产生体单元

命令操作:

VLSCALE, NV1, NV2, NINC, RX, RY, RZ, KINC, NOELEM, IMOVE

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Mapped→4 to 6 sided Main Menu→
Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Free

5.6 划分网格注意事项

如果在划分网格时遇到问题, 可以参考注意事项。

5.6.1 避免尖锐角度

如果面或体存在很尖锐的角度, 划分网格经常会出现困难甚至划分失败(图 5-75)。用户要想办法避免(图 5-76)。

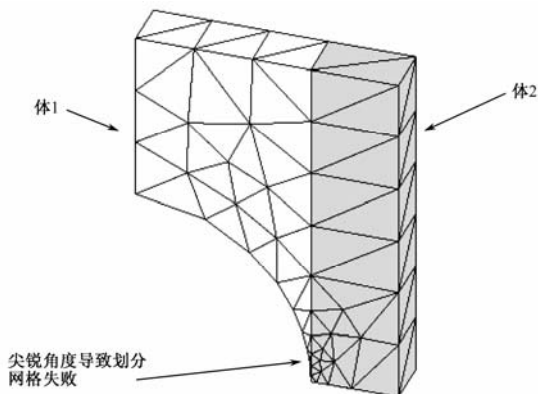


图 5-75 尖锐角度导致划分网格失败

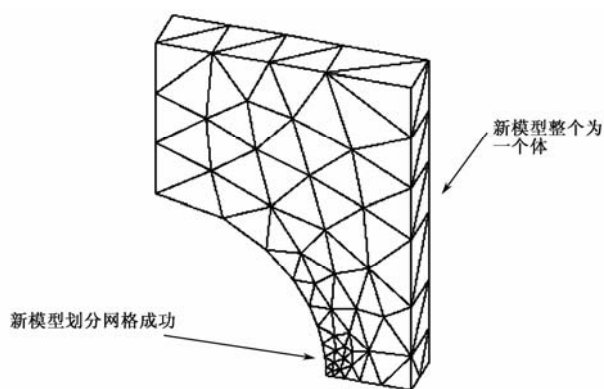


图 5-76 新模型划分网格成功

5.6.2 避免剧烈网格渐变

剧烈网格渐变也经常导致划分网格不理想甚至划分失败（图 5-77）。用户应该减慢网格渐变速度（图 5-78）。

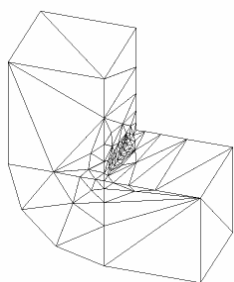


图 5-77 剧烈网格渐变导致划分网格不理想

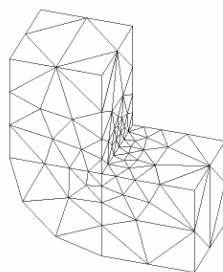


图 5-78 减慢网格渐变速度

5.7 综合实例

实例 5-4 划分铜导体模型网格

一个铜导体镶嵌在一个机器槽中（图 5-79），划分此铜导体网格，实体模型如图 5-80 所示。

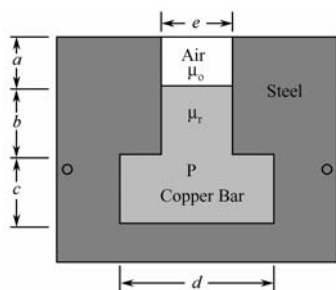


图 5-79 镶嵌在一个机器槽中的铜导体

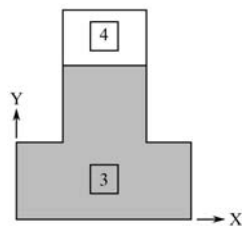


图 5-80 实体模型

几何参数如下：

$$a = 6.45 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$b = 8.55 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$c = 8.45 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 18.85 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$e = 8.95 \times 10^{-3} \text{ m}$$



结果文件

——附带光盘 “End\Ch5\实例 5-4” 文件夹



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch5\实例 5-4.avi”

1. GUI 操作

(1) 设定单元属性

首先选择 PLANE13 单元。选择路径 Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete (图 5-81)，单击 “Add...” 按钮添加单元，选择单元 “PLANE13” (图 5-82)。

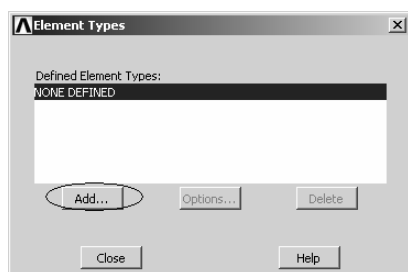


图 5-81 定义单元

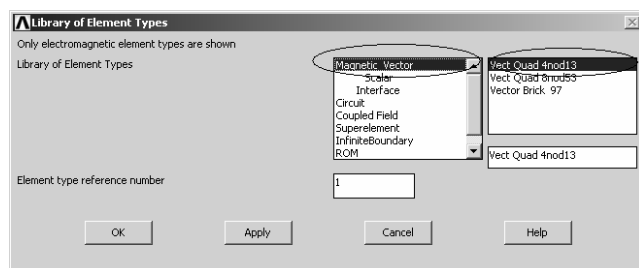


图 5-82 选择单元 “PLANE13”

(2) 设置参数

选择路径 Utility Menu → Parameters → Scalar Parameters，输入框中分别输入 (图 5-83)：

$$A=6.45E-3$$

$$B=8.55E-3$$

$$C=8.45E-3$$

$$D=1.885E-2$$

$$E=8.95E-3$$

$$F=(D-E)/2$$

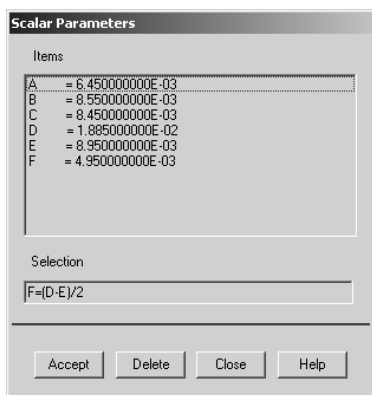


图 5-83 设置参数

(3) 建立实体模型

首先建立铜导体实体模型，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，建立两个矩形。X1,X2,Y1,Y2 坐标值分别为 “0,d,0,c” (图 5-84) 和 “F,D-F,C,B+C”。

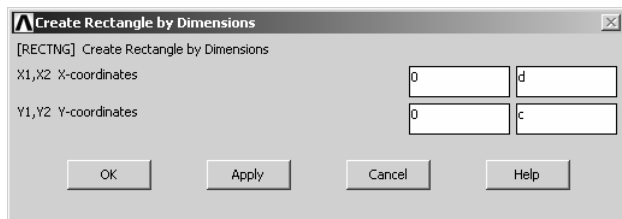


图 5-84 建立铜导体实体模型

然后，将两个面相加形成一个单独的面，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Add→Areas。

之后建立 X1,X2,Y1,Y2 坐标值分别为 “F,F+E,B+C,B+C+A” 的空气模型。然后黏合铜导体模型和空气模型，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas。

(4) 划分网格

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool，打开 “MeshTool”，分别设定各个选项。

首先单元属性选择 “Areas” (图 5-85)。

然后单击 “Global” 后的 “Set” 按钮设置全局网格控制项 (图 5-86)。



图 5-85 单元属性

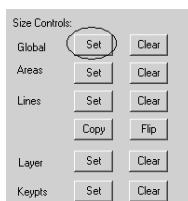


图 5-86 设置全局网格控制项

在“SIZE”后输入“D/15”。单击“OK”按钮确认操作（图 5-87）。

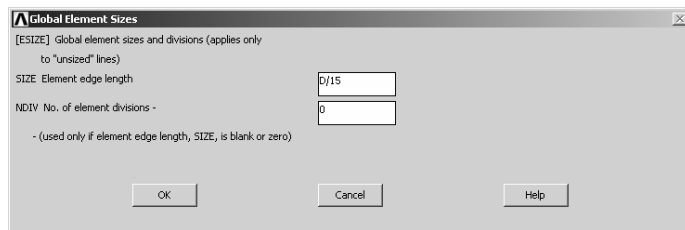


图 5-87 全局网格控制

最后选择“Areas”，网格形状“Tri”，自由网格“Free”，单击“Mesh”按钮划分网格（图 5-88）。

划分完网格的模型如图 5-89 所示。

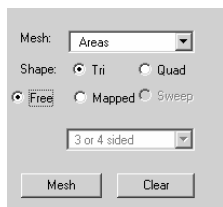


图 5-88 划分网格

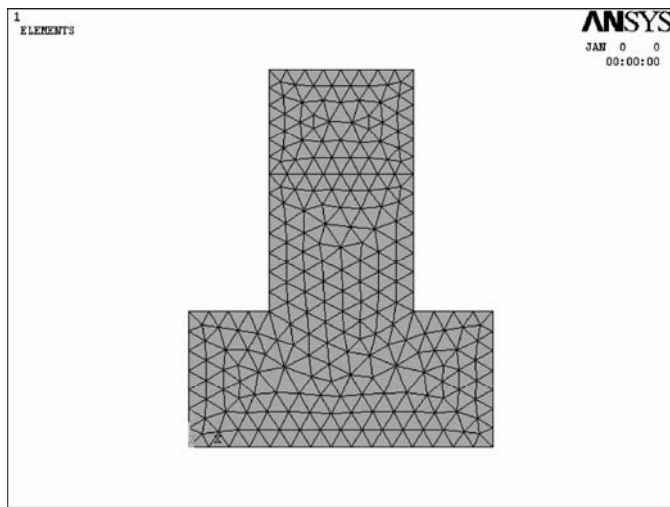


图 5-89 划分完网格的模型

2. 命令流操作

```
/PREP7
ET,1,PLANE13          ! 设置单元属性
A=6.45E-3              ! 定义参数
B=8.55E-3
C=8.45E-3
D=18.85E-3
E=8.95E-3
F=(D-E)/2
RECTNG,0,D,0,C         ! 建立实体模型
RECTNG,F,D-F,C,B+C
AADD,1,2
RECTNG,F,F+E,B+C,B+C+A
```

AGLUE,1,3

SMRT,OFF

! 划分网格设置

ESIZE,D/15

MSHK,0

MSHA,1,2D

AMESH,ALL

! 划分网格

实例 5-5 划分双导线系统网格

两个矩形平行导线，中线距离为 d ，电流方向垂直于纸面模型如图 5-90、图 5-91 所示。

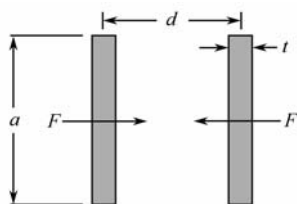


图 5-90 问题模型

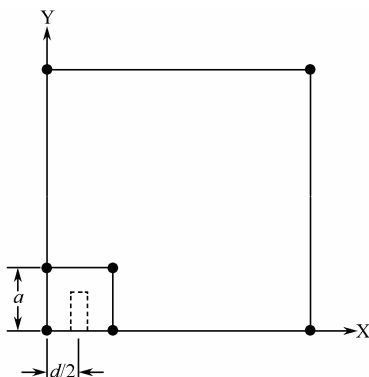


图 5-91 实体模型



结果文件

——附带光盘“End\Ch5\实例 5-5”文件夹



动画演示

——附带光盘“AVI\Ch5\实例 5-5.avi”

1. GUI 操作

(1) 设定单元属性

首先选择 PLANE53 单元。选择路径 Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete，单击“Add...”按钮添加单元（图 5-92），选择单元“PLANE53”（图 5-93），单击“Apply”按钮确认。

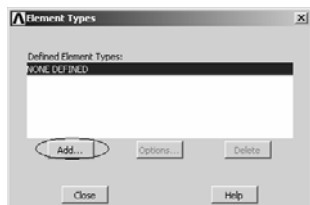


图 5-92 定义单元

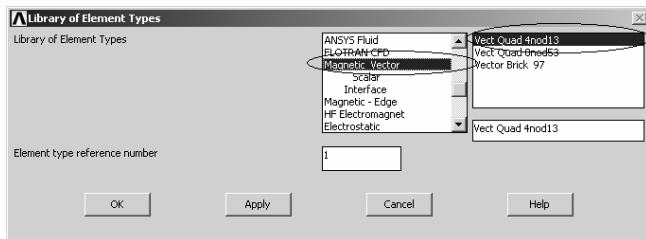


图 5-93 选择“PLANE53”

然后定义 INFIN9 远场单元，注意：此时单元编号为“2”，单击“OK”按钮确认（图 5-94）。定义完的单元属性如图 5-95 所示。

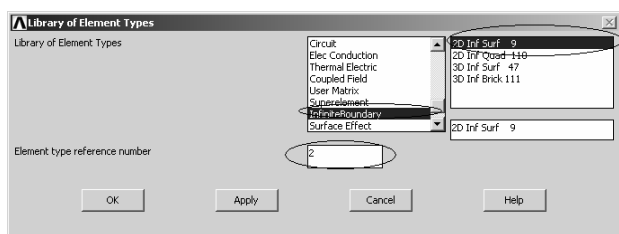


图 5-94 定义 INFIN9 远场单元

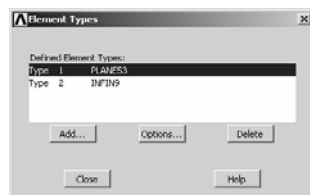


图 5-95 定义完的单元属性

(2) 定义参数

选择路径 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，输入框中分别输入（图 5-96）：

D=1.00E-2
A=1.20E-2
T=2.00E-2
OB=4.00E-2
X1=D/2-T/2
X2=D/2+T/2
GP=2.00E-4

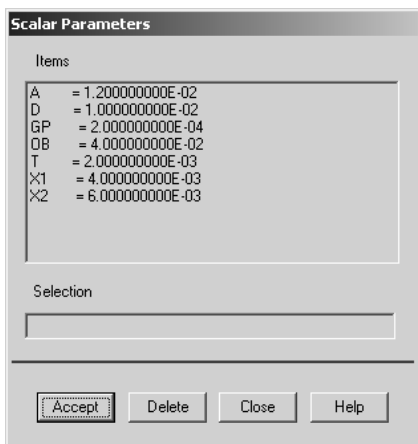


图 5-96 定义参数

(3) 建立实体模型

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，建立四个矩形。X1,X2,Y1,Y2 坐标值分别为“0,OB,0,OB”，“0,0.012,0,0.012”，“X1,X2,0,A/2”，“X1-GP,X2+GP,0,A/2+GP”。

然后，采用重叠操作，重叠所有矩形。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Areas（图 5-97）。

(4) 划分网格

选择路径 Utility Menu→Select→Entities，先选择 X= 0.012 处的点（图 5-98）。

再附加选择 Y= 0.012 处的点（图 5-99）。

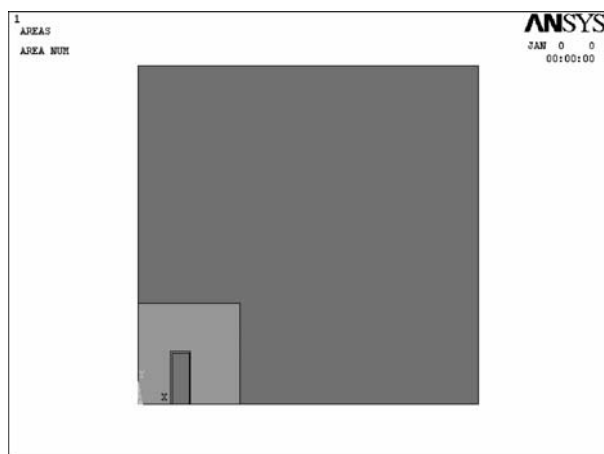


图 5-97 重叠所有矩形

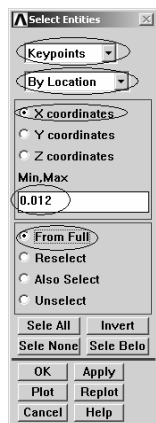


图 5-98 选择 X=0.012 处的点

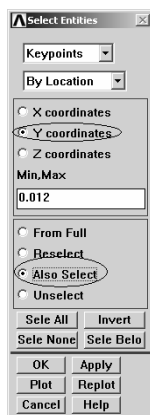


图 5-99 附加选择 Y=0.012 处的线

然后，设置选中的线上的关键点附近的网格控制选项。选择路径 Main Menu → Preprocessor → Meshing → Size Cntrl → ManualSize → Keypoints → All KPs，“SIZE”后输入框输入“A/8”（图 5-100）。

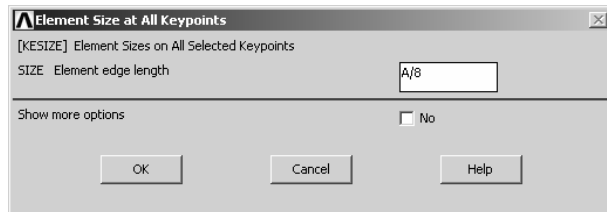


图 5-100 设置选中的线上的关键点附近的网格控制选项

然后选择路径 Utility Menu → Select → Entities，选择所有其他节点，单击“Invert”按钮（图 5-101）。接着选择路径 Main Menu → Preprocessor → Meshing → Size Cntrl → ManualSize → Keypoints → All KPs，“SIZE”后输入框输入“OB/5”。

然后，再选中所有关键点。选择路径 Utility Menu → Select → Entities，选择“SELE

All”，然后单击“Cancel”按钮退出（图 5-102）。

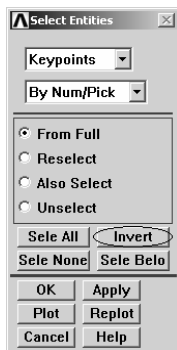


图 5-101 选择所有其他节点

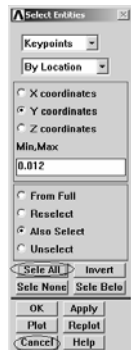


图 5-102 选中所有关键点

再采用类似方法，选择 $X = OB$ ，再附加选择 $Y = OB$ 处的线。

然后选择单元类型 2，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs，选择单元类型 2（图 5-103）。

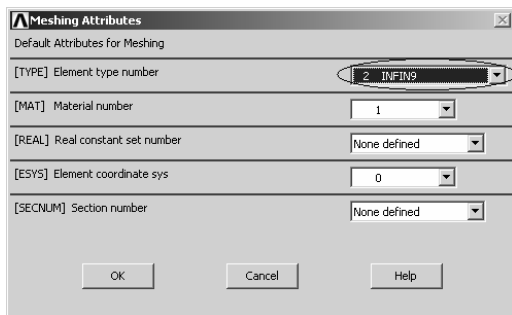


图 5-103 选择单元类型 2

然后，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines，划分网格（图 5-104）。

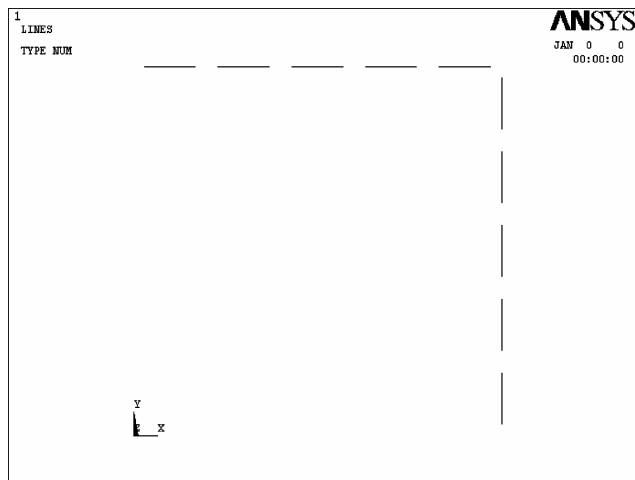


图 5-104 划分选中线段

然后，使用前述方法再选择所有线。

最后，划分面的网格。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**MeshTool**，打开“MeshTool”，分别设定各个选项。首先单元属性选择“Areas”（图 5-105）。单击“Set”按钮设置所有面单元类型为 1（图 5-106）。

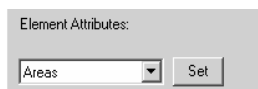


图 5-105 单元属性

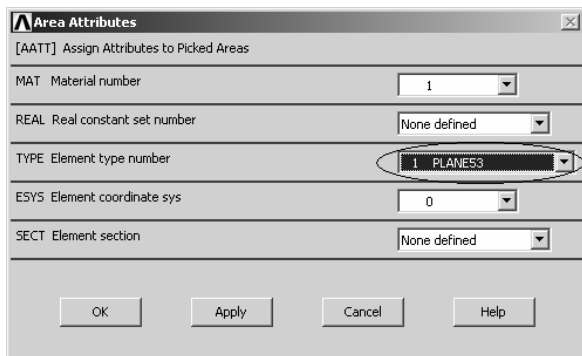


图 5-106 设置单元类型为 1

选择“Areas”，单元形状“Quad”，“Free”自由网格，最后单击“Mesh”按钮划分网格（图 5-107）。划分完的网格如图 5-108 所示。

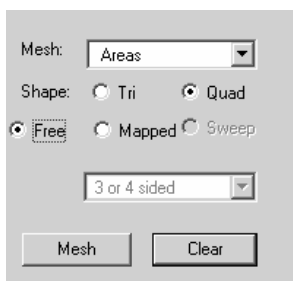


图 5-107 划分网格

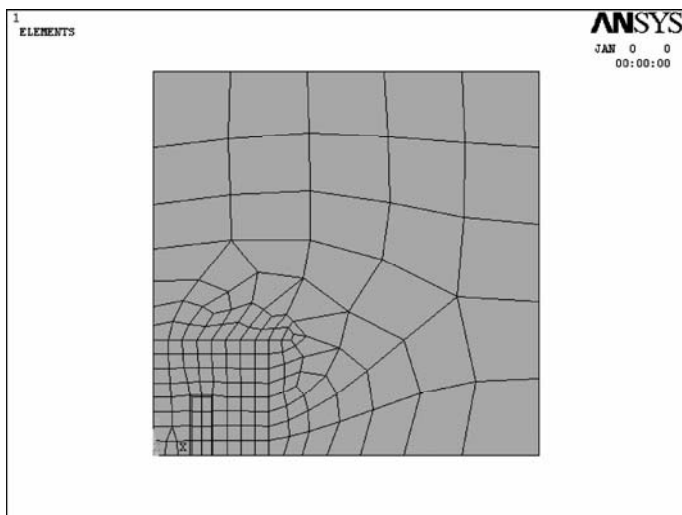


图 5-108 划分完的网格

2. 命令流操作

```
/PREP7
```

```
ET,1,PLANE53
```

！设定单元属性

```
ET,2,INFIN9
```

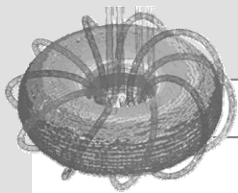
```
MP,MURX,1,1
```

```
MP,MURX,2,1
```

```
D=,01
```

！定义参数

```
A=.012
T=.002
OB=.04                                ! 外部边界大小
X1=D/2-T/2
X2=D/2+T/2
GP=.0002                              ! 导体周围气隙
RECTNG,0,OB,0,OB                      ! 建立实体模型
RECTNG,0,.012,0,.012
RECTNG,X1,X2,0,A/2
RECTNG,X1-GP,X2+GP,0,A/2+GP
AOVLAP,ALL
KSEL,S,LOC,X,0,.012                  ! 设定网格控制项
KSEL,R,LOC,Y,0,.012
KESIZE,ALL,A/8
KSEL,INVE
KESIZE,ALL,OB/5
KSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,OB                      ! 划分远场单元网格
LSEL,A,LOC,Y,OB
TYPE,2
LMESH,ALL
LSEL,ALL
MSHK,0                              ! 划分其他单元网格
MSHA,0,2D
TYPE,1
AMESH,ALL
```



第6章 求解和结果查看

ANSYS 能够求解有限元联立方程，求解的结果如下：

- ① 节点的自由度值，即基本解；
- ② 原始解的导出值，即单元解。

ANSYS 程序中有几种解方程的方法：直接解法、稀疏矩阵直接解法、雅可比共轭梯度法（JCG），不完全分解共轭梯度法（ICCG），预条件共轭梯度法（PCG），自动迭代法（ITER），以及分解块法（DDS）等。默认为直接解法。

求解之后，用户想要查看结果，ANSYS 后处理器可以完成此操作。这一步可能是整个分析过程中最重要的一步，因为用户想要知道施加的负载怎么样影响到自己的设计，自己划分的网格好用与否等。



本章内容

- ANSYS 电磁场求解及结果查看概述
- 磁场负载
- 电场负载
- 求解
- 查看结果



本章案例

- 永磁铁
- 二维带小孔平行板电容
- 二维带小孔平行板电容求解和查看结果
- 永磁铁求解和查看结果
- 电导率计算
- 三维带孔电容
- 双导线系统

6.1 ANSYS 电磁场求解及结果查看概述

ANSYS 电磁场求解方法仍然使用 ANSYS 求解的一般方法，但是其中会使用一些特殊的单元、命令、宏等，而且需要用户熟悉电磁场特性和一些基本的求解方法，尤其是电磁场的边界条件要熟悉。一些特殊操作有助于用户查看计算结果。

电磁场求解及结果查看一般步骤为

- ① 加载；
- ② 进入求解器；
- ③ 选择求解方法；
- ④ 求解；
- ⑤ 查看结果。

6.2 磁场负载

磁场负载在前面已经做过一些介绍，这里介绍其他常用负载。

6.2.1 永磁铁

首先说明，定义永磁铁不是通过加载负载完成的，但是由于把永磁铁的定义放在本小节和其他内容衔接较紧，而且南北极理解为负载比较直观，所以，永磁铁定义放在本小节而不是在单元属性定义中介绍。

定义永磁铁，首先需要退磁曲线（如果线性，则需要相对磁导率）和矫顽力矢量的分量（三分量为 MGXX, MGYY 和 MGZZ）。这里主要介绍线性永磁铁的定义方法。

定义矫顽力的方法如下所述。

命令操作：

MP, MGXX(或 MGYY, MGZZ), MAT, C0

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models→Electromagnetics→Coercive Force→Orthotropic(或 Constant)（图 6-1）

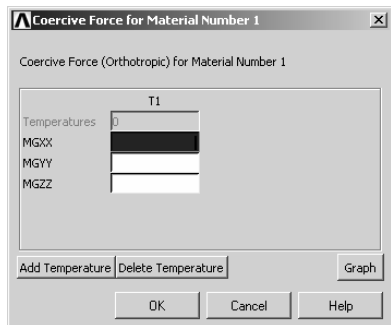


图 6-1 定义矫顽力

如果只定义 **MGXX**, **MGYY** 和 **MGZZ** 中的一个, 则磁轴分别位于 *X,Y,Z* 轴上。如果定义多个, 则取其矢量合成方向。例如, 采用操作:

```
mp,mgxx,1,hc*cos(30)mp,mgyy,1,hc*sin(30)
```

或如图 6-2 所示操作, 则定义的永磁铁如图 6-3 所示。

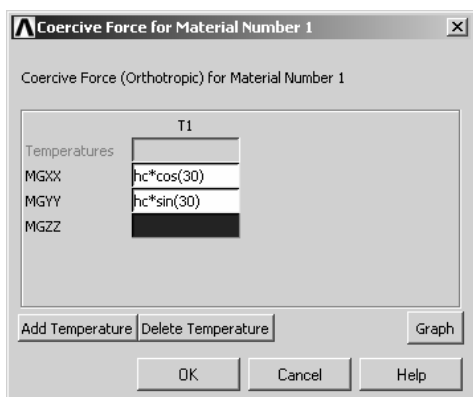


图 6-2 定义矫顽力

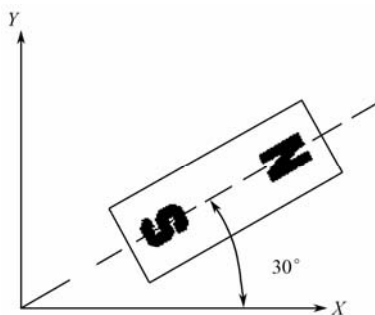


图 6-3 永磁铁示意图

6.2.2 矢量磁位

第 3 章已经介绍过矢量磁位 **AZ**, 这里进行进一步的应用介绍。

矢量磁位可以定义磁力线平行、远场、周期边界条件和外部强加磁场。对于远场问题, 可以使用 **INFIN9** 单元或 **INFIN110** 单元来代表无限边界模型。

INFIN9 用来对二维无边界场问题进行建模 (图 6-4)。在磁场问题中, 此单元的两个节点拥有矢量磁位, 其包围的单元可以是 **PLANE13** 或者 **PLANE53** (图 6-5)。

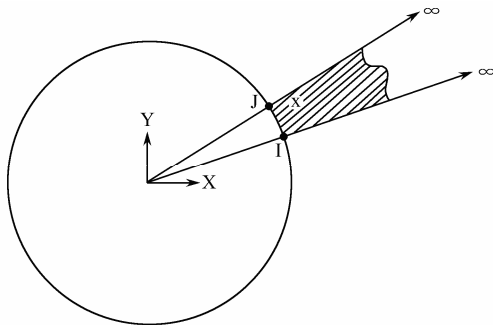


图 6-4 INFIN9 单元

例如, 选中 **INFIN9** 单元后, 输入如下操作:

```
D,ALL,AZ,0
```

或 “Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Boundary→Vector Poten 或 Flux Par'l→On Lines 或 On Nodes” 操作, 则施加无限边界的 **AZ**。

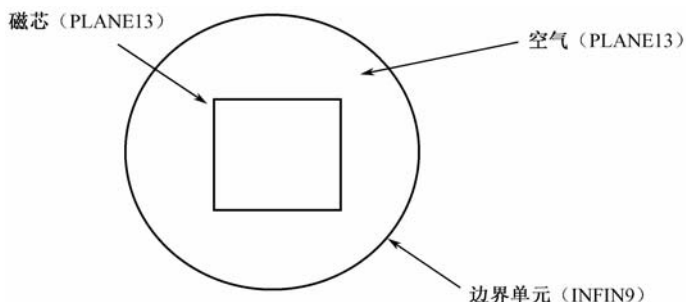


图 6-5 INFIN9 单元使用方法

6.2.3 磁场激励

1. 电流源密度 JS

电流源密度 JS 在源导体上施加电流，其单位为 A/m^2 ，二维仿真时，只有 Z 方向的 JS 是有效的。正值表示沿+Z 方向，负值相反。可以直接在单元上施加电流源密度。

一般是直接在单元上施加电流源密度。

命令操作：

BFE, ELEM, JS, STLOC, VAL1, VAL2, VAL3, VAL4

如果此时 STLOC=1，则 VAL1, VAL2, VAL3 代表电流源密度的 X, Y, Z 分量，VAL4 代表相位角。

菜单操作：

Main Menu → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Magnetic → Excitation → Curr Density → On Elements (图 6-6)

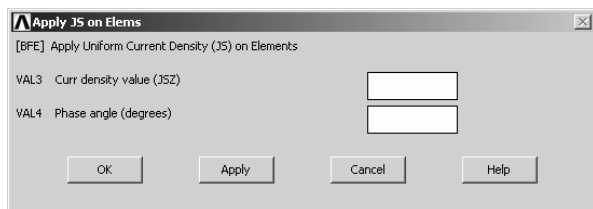


图 6-6 在单元上施加电流源密度

2. 电压降 VOLT

此载荷在线圈上施加电压降，必须使用 MKS 单位制，且只能使用 PLANE53 单元，使用 AZ 和 CURR 自由度。

命令操作：

BFE, ELEM, VLTG, STLOC, VAL1, VAL2, VAL3, VAL4

如果此时 STLOC = 1，则 VAL1 是电压降，VAL2 是相位角。

命令操作：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Excitation→App Volt Drop→On Elements (图 6-7)

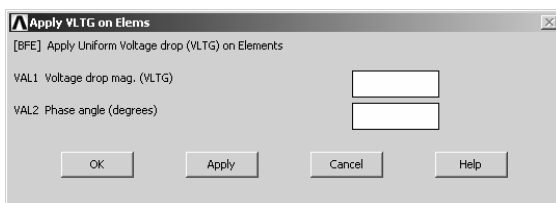


图 6-7 单元上施加电压降



ANSYS 的命令参数繁多，一个简单的了解各参数意义的方法就是打开其对应的 GUI 操作，查看对应参数意义。

注意 为了得到正确结果，用户还必须将线圈上所有节点的 CURR 耦合。这是因为线圈电路串联，电流处处相等。使用 CP 命令或对应菜单操作 Main Menu→Preprocessor→Coupling/Ceqn→Couple DOFs，完成 CURR 的耦合。

6.2.4 磁场标识

1. 力标识

使用宏 FMAGBC 标识力和力矩的计算。此宏自动施加虚位移的麦克斯韦面（后面介绍）。宏周围必须包围至少一层空气单元。将需要计算力和位移的对象定义为一个单元。

命令操作：

FMAGBC, Cnam1, Cnam2, Cnam3, Cnam4, Cnam5, Cnam6, Cnam7, Cnam8, Cnam9

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Flag→Comp. Force/Torq (图 6-8)

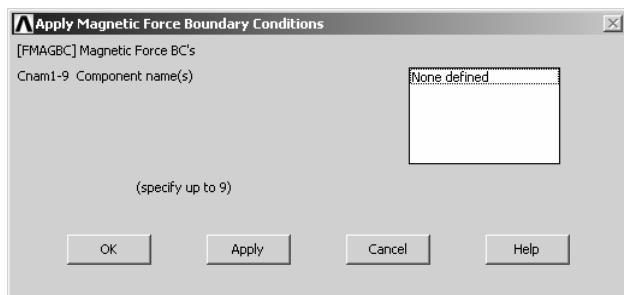


图 6-8 力标识

在后处理器查看力的结果，方法如下所述。

命令操作：

FMAGSUM, Cnam1, Cnam2, Cnam3, Cnam4, Cnam5, Cnam6, Cnam7, Cnam8, Cnam9

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Elec&Mag Calc→Component Based→Force (图 6-9)

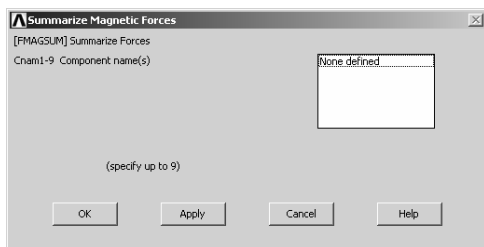


图 6-9 在后处理器查看力的结果

在后处理器查看力矩的结果, 方法如下所述。

命令操作:

TORQSUM, Cnam1, Cnam2, Cnam3, Cnam4, Cnam5, Cnam6, Cnam7, Cnam8, Cnam9

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Elec&Mag Calc→Component Based→Torque

2. 无限表面标识 (INF)

这不是载荷, 但是定义无限单元表面所必需的。

命令操作:

SF, Nlist, INF

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Flag→AppInfinite→On Nodes

6.2.5 麦克斯韦面 (MXWF)

麦克斯韦面并不是真正意义上的载荷, 但是表明磁场力的分布要在此面上计算。通常在空气—铁界面的空气一侧的单元指定麦克斯韦面。ANSYS 计算界面上的力并且将它们储存在空气单元中。用户可以在一般后处理器 POST1 中查看这些力。然后, 如果做耦合分析, 可以将这些力作为结构场的载荷。

命令操作:

SF, Nlist, MXWF

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Other→AppMaxwell→On Nodes

6.2.6 磁虚位移 (MVDI)

这些载荷引起模型上力的计算。此方法可以代替麦克斯韦面法, 只不过采用磁虚位移法。要采用此方法, 在所有感兴趣节点设置 $MVDI = 1.0$ 且在所有临近空气节点设置 $MVDI = 0.0$ (默认)。力将被计算并且储存在空气单元中 (图 6-10)。

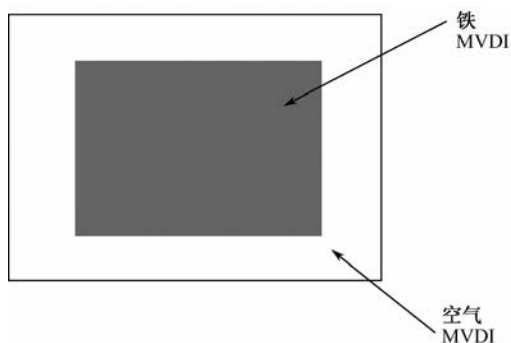


图 6-10 磁虚位移

实例 6-1 永磁铁建模和加载

一个 $A \times B$ 的条形磁铁，其中 $A = 1$ ， $B = 2$ ，采用无限边界单元（图 6-11）。建立永磁铁模型并施加负载。

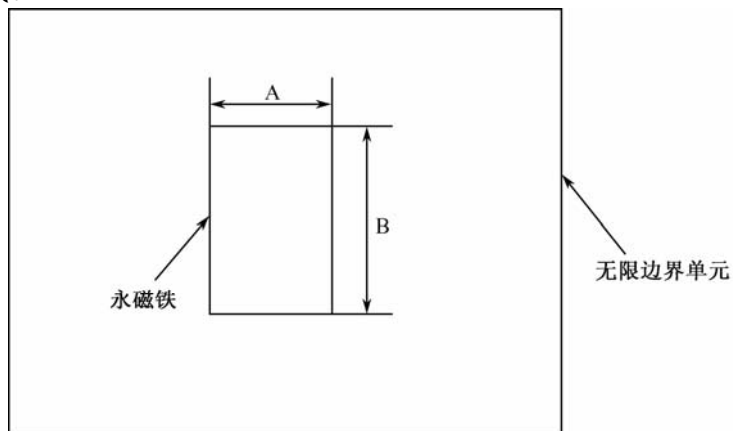


图 6-11 永磁铁



结果文件

——附带光盘 “End\Ch6\实例 6-1” 文件夹



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch6\实例 6-1.avi”

1. GUI 操作

(1) 设定单位制和参数

首先设定 MKS 单位制。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Electromagnetic Units，选择 “MKS system”（图 6-12）。

然后定义参数如下：

HC=895000

A=1

B=2

C=10

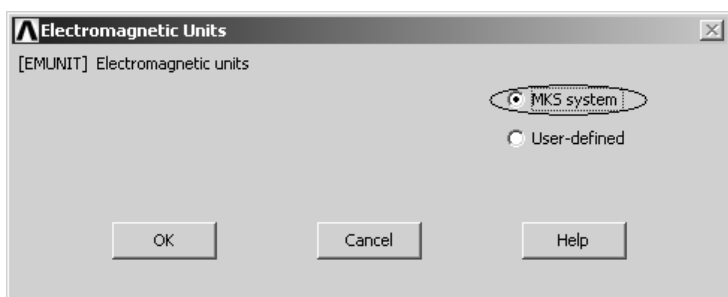


图 6-12 设定 MKS 单位制

选择路径 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，输入以上参数（图 6-13）。

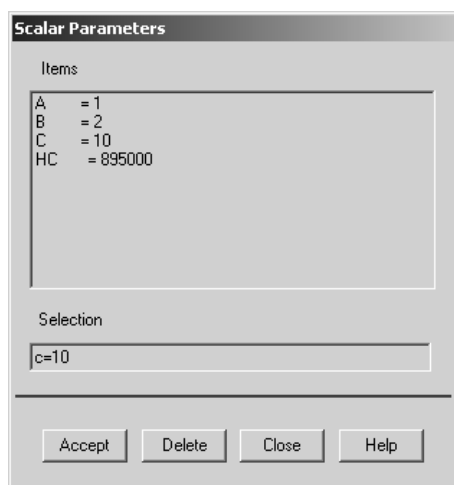


图 6-13 定义参数

（2）建立模型

首先定义单元 PLANE53 和 INFIN9，它们单元编号分别为 1 和 2。

选择 PLANE53 单元。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Types→Add/Edit/Delete（图 6-14），单击“Add...”按钮添加单元，选择单元“PLANE53”（图 6-15），单击“Apply”按钮确认。

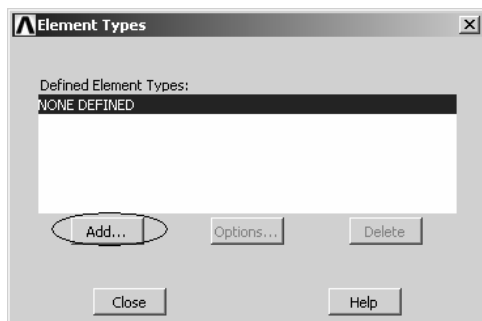


图 6-14 定义单元

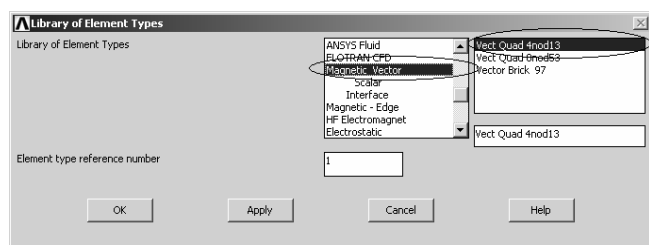


图 6-15 选择“PLANE53”

然后，定义 INFIN9 远场单元，注意：此时单元编号为“2”，单击“OK”按钮确认（图 6-16）。定义完的单元属性如图 6-17 所示。

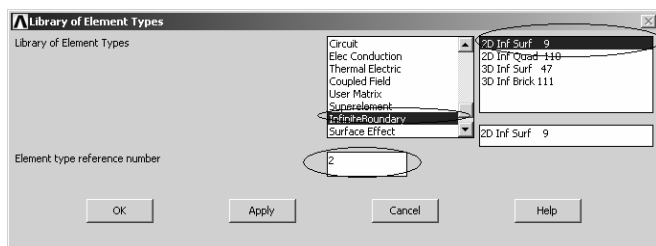


图 6-16 定义 INFIN9 远场单元

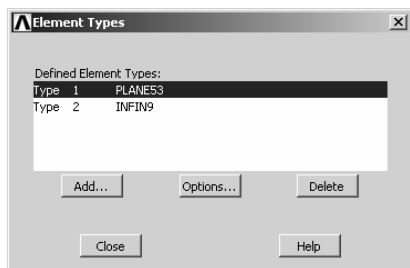


图 6-17 定义完的单元属性

然后定义空气和铁的相对磁导率，分别为 1 和 5.30504。

首先，设定空气的相对磁导率。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，单击后打开“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框（图 6-18）。

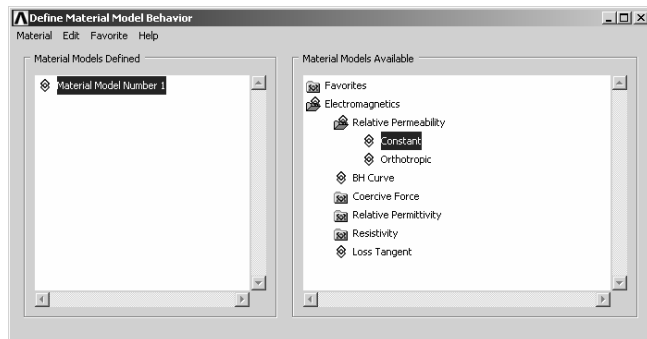


图 6-18 定义相对磁导率

选择路径 Electromagnetics→Relative Permeability→Constant，双击打开对话框定义空气相对磁导率，输入“1”（图 6-19）。单击“OK”按钮确认。

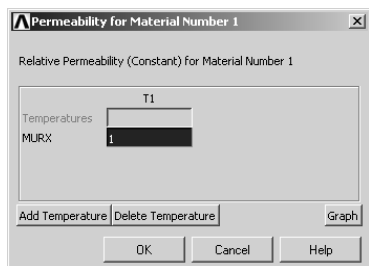


图 6-19 定义空气相对磁导率

然后，定义材料 2 的相对磁导率。定义完材料 1 的相对磁导率后，在“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框中选择 Material→New Model...（图 6-20），单击打开“Define Material ID”定义材料 ID 对话框，输入“2”（图 6-21）。

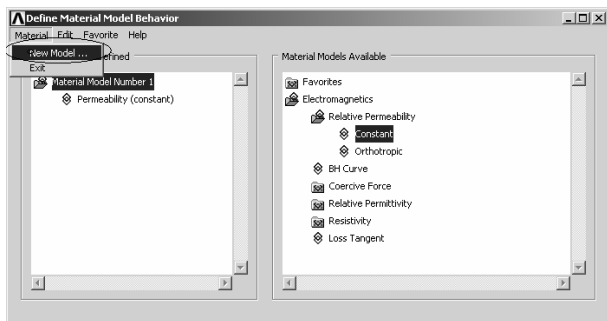


图 6-20 定义新材料

然后，选择新定义的材料 2，采用定义材料 1 的相对磁导率的方法，定义材料 2 的相对磁导率，其值为 5.30504。关闭“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框，完成定义。

最后，定义永磁铁即材料 2 的矫顽力。选择路径 Electromagnetics→Coercive Force→Constant，双击打开对话框，定义矫顽力大小为 h_c （图 6-22）。

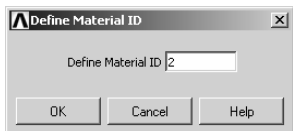


图 6-21 定义材料 ID 对话框

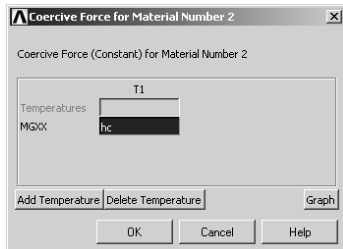


图 6-22 定义永磁铁即材料 2 的矫顽力

然后，建立实体模型。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，建立 $X1, X2, Y1, Y2$ 分别为“-A,A,-B,B”和“-C,C,-C,C”的两个矩形。再使用重合操作重合两个面。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→

Operate→Booleans→Overlap→Areas (图 6-23)。

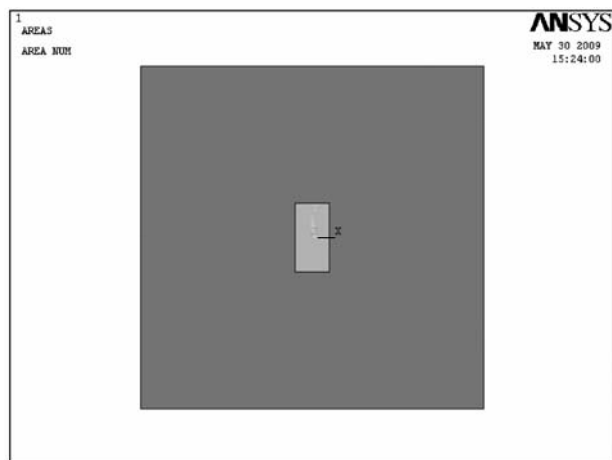


图 6-23 实体模型

(3) 划分网格设置

分别为面 1 和 3 设定材料属性。先选择面 1，材料属性为 1。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas，选择面 1，再设定“MAT”为“1” (图 6-24)。

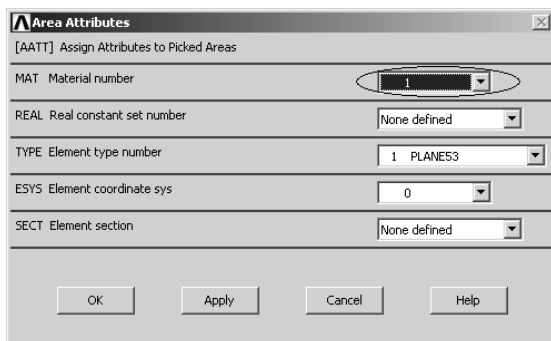


图 6-24 面 1 材料属性为 1

类似方法选择面 3，材料属性为 2 (图 6-25)。

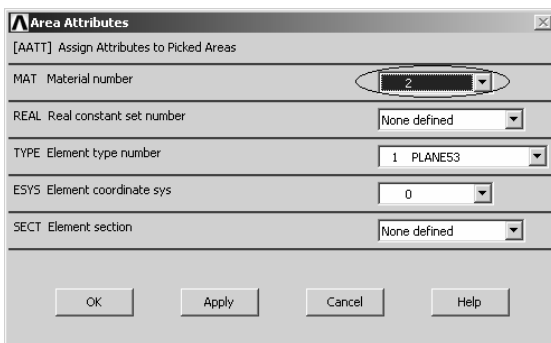


图 6-25 面 3 材料属性为 2

然后，选择最外层的线，设置它们为无限边界单元，并设置网格控制。选择路径：Utility Menu→Select→Entities，选择最外层的线 5,6,7,8。

然后，设置这些线单元为 INFIN9。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs，选择单元类型 2（图 6-27）。

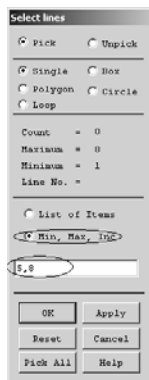


图 6-26 选择最外层的线 5,6,7,8

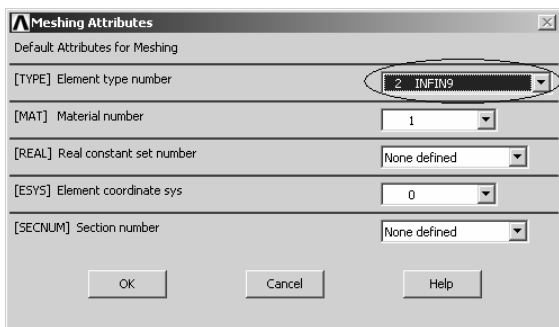


图 6-27 选择单元类型 2

然后，设置这些线单元的网格控制选项。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→All Lines，将它们分别划分为 30 段（图 6-28）。

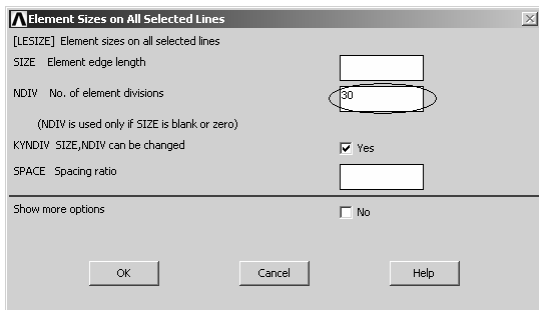


图 6-28 线划分为 30 段

然后，采用以上类似操作，将线 1,2,3,4 划分为 20 段。线段划分效果如图 6-29 所示。

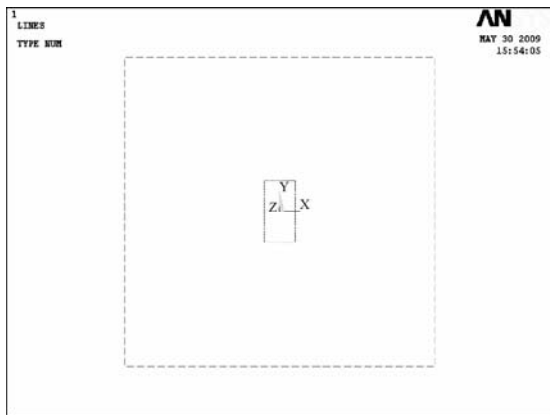


图 6-29 线段划分效果

最后, 划分网格, 选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Free (图 6-30)。

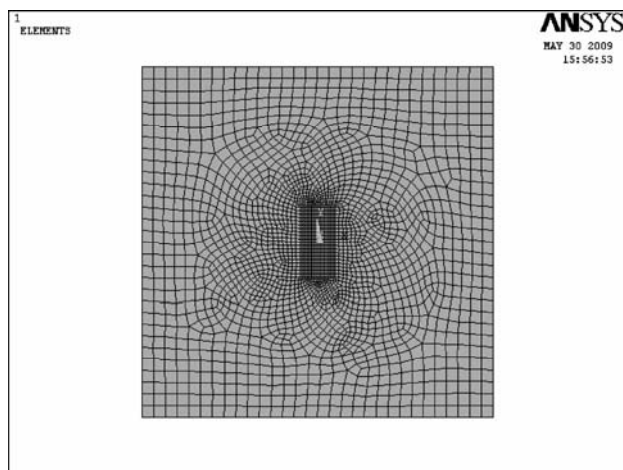


图 6-30 划分的网格

(4) 加载负载

为最外层的无限边界单元施加 AZ 边界条件。

首先选择所有最外层节点。选择路径 Utility Menu→Select→Entities, 选择 “Nodes” 和 “Exterior” (图 6-31)。

然后对所有选择的节点施加 AZ 负载为 “0”。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Boundary→Vector Poten→Flux Par'l→On Nodes (图 6-32)。



图 6-31 选择所有最外层节点

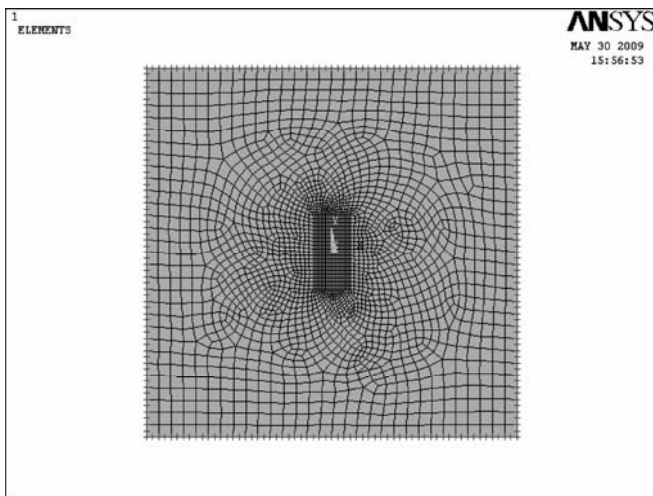


图 6-32 施加 AZ 负载为 “0” 后的模型

2. 命令流操作

```
/PREP7  
EMUNIT,MKS
```

! 定义电磁单位为国际标准单位

```

HC=895000                                ! 设定参数
A=1
B=2
C=10
ET,1,PLANE53                             ! 定义单元
ET,2,INFIN9
MP,MURX,1,1                               ! 设定空气的相对磁导率
MP,MURX,2, 5.30504                       ! 设定磁铁的相对磁导率
MP,MGY,2,HC                               ! 设定矫顽力
RECTNG,-A,A,-B,B                         ! 建立模型
RECTNG,-C,C,-C,C
AOVLAP,ALL
ASEL,S,AREA,,1                           ! 定义面单元属性
AATT,2
ASEL,S,AREA,,3
AATT,1
ASEL,ALL
TYPE,1
LSEL,S,LINE,,5,8                         ! 定义无限边界单元
TYPE,2
LESIZE,ALL,,,30                          ! 划分网格设置
LSEL,S,LINE,,1,4
LESIZE,ALL,,,20
AMESH,ALL                                ! 划分网格
NSEL,,EXT                                 ! 设定边界条件
D,ALL,AZ,0
FINI

```

6.3 电场负载

电场负载在前面已经做过一些介绍，这里介绍其他常用负载。

6.3.1 电流 (AMPS)

电流 AMPS 是集中节点力载荷，一般设置在模型的边界。正值表示电流流入节点，对于一致的电流密度分布，耦合适当节点的电压 VOLT 自由度，然后在其中一个节点施加电流。

命令操作：

```
F, NODE, AMPS, VALUE, VALUE2, NEND, NINC
```

菜单操作：

```
Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Excitation→Current (图 6-33)
```

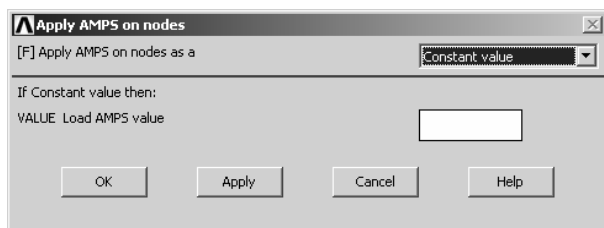


图 6-33 在节点施加电流

6.3.2 电压 (VOLT)

电压是一种自由度约束，常被用来施加在模型的边界。典型的应用是在导体的一端施加 0 电压而在另一端施加所需的电压。

命令操作：

D, NODE, VOLT, VALUE, VALUE2, NEND, NINC, Lab2, Lab3, Lab4, Lab5, Lab6

菜单操作：

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage (图 6-34)

6.3.3 电荷 (CHRG)

此为集中节点力负载。

命令操作：

F, NODE, CHRG, VALUE, VALUE2, NEND, NINC

菜单操作：

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Excitation→Charge→On Nodes (图 6-35)

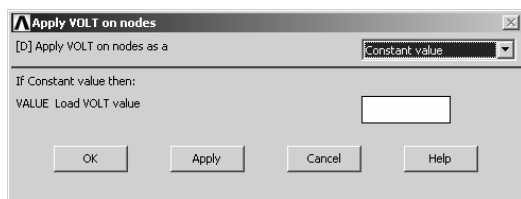


图 6-34 在节点施加电压

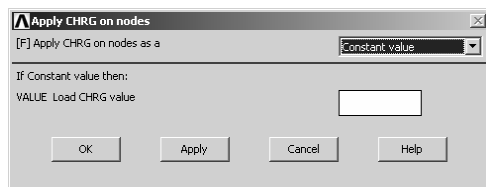


图 6-35 电荷

6.3.4 表面电荷密度 (CHRGs)

命令操作：

SF, Nlist, CHRGs, VALUE, VALUE2

菜单操作：

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Excitation→Surf Chrg Den (图 6-36)

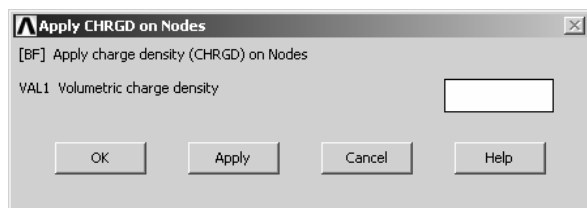


图 6-36 表面电荷密度

6.3.5 无限表面标识 (INF)

这不是负载，但是指明无限单元的存在。

命令操作：

SF, Nlist, INF, VALUE, VALUE2

菜单操作：

Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Flag→Infinite Surf→option

实例 6-2 二维带小孔平行板电容

一个平行板电容，上极板有一个小缺口，缺口左端距上极板左端 $A/2$ 。电容厚度为 B 。其中 $A=1$ ， $B=0.1$ 。电介质的相对介电常数为 1，上极板电压为 5V，下极板 0V。建立此模型并施加负载（图 6-37）。

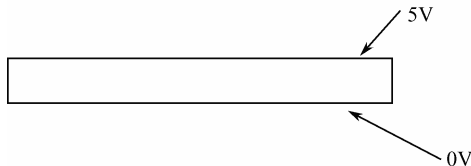


图 6-37 二维带小孔平行板电容



结果文件

——附带光盘 “End\Ch6\实例 6-2” 文件夹



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch6\实例 6-2.avi”

1. GUI 操作

(1) 设定图形界面的使用偏好

操作方法 Main Menu→Preferences，弹出“Preferences for GUI Filtering”对话框，选择“Electric”（图 6-38），这样可以过滤不需要的图形工作菜单，简化后续操作。

(2) 定义参数

定义参数如下：

A=1

B=0.1

选择路径 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，定义上述参数（图 6-39）。

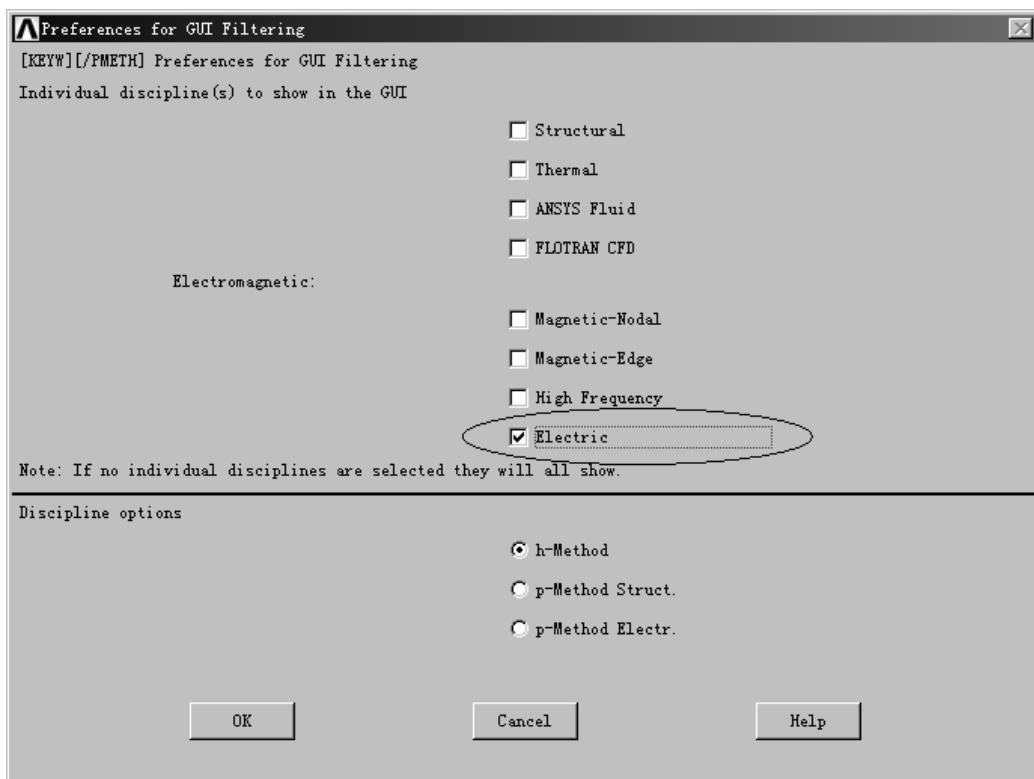


图 6-38 设定使用偏好

(3) 建立模型

首先，定义单元。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/ Delete，出现“Element Types”单元类型对话框，此处单击“Add...”按钮添加单元（图 6-40）。

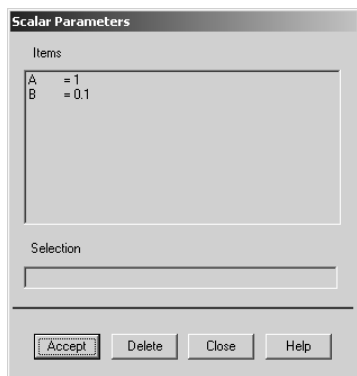


图 6-39 定义参数

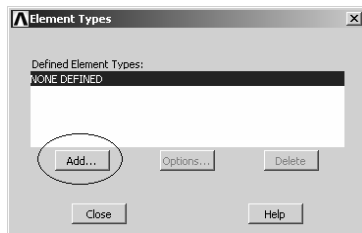


图 6-40 单击“Add...”按钮添加单元

弹出“Library of Element Types”单元类型库对话框，左侧选择栏中选择“Electrostatic”，右侧选择栏中选择“2D Quad 121”（图 6-41）。

单击“OK”按钮确认后，出现“Element Types”单元类型对话框，提示已定义 PLANE121（图 6-42）。单击“Close”按钮关闭。

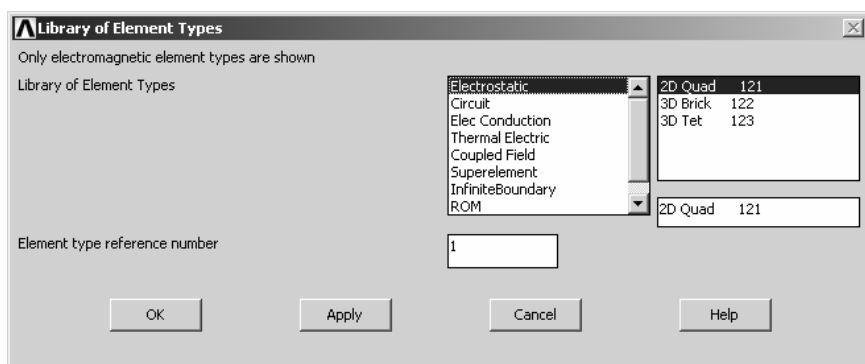


图 6-41 选择 PLANE121

然后，定义材料属性，定义电介质的相对介电常数。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，单击后打开“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框（图 6-43）。

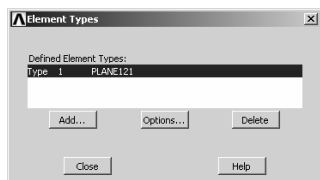


图 6-42 已定义 PLANE121

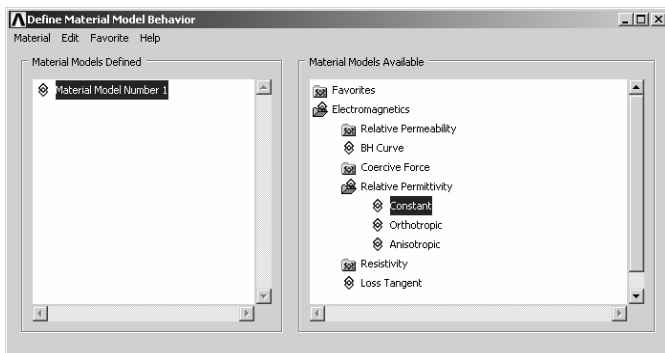


图 6-43 定义材料模型性质对话框

右边“Material Models Available”栏中选择路径 Electromagnetics→Relative Permittivity→Constant，双击打开对话框定义材料 1 的相对介电常数（图 6-44）。

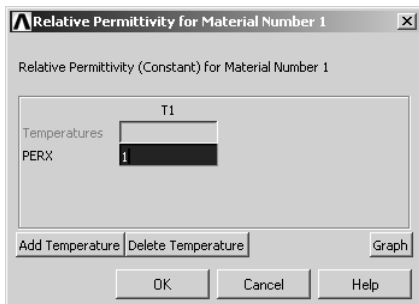


图 6-44 相对介电常数

然后，定义关键点。关键点坐标分别为 (0,0)，(A,0)，(0,B)，(A/2,B)，(A/2+B,B)，(A,B)。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS，分别输入上述坐标值（图 6-45）。

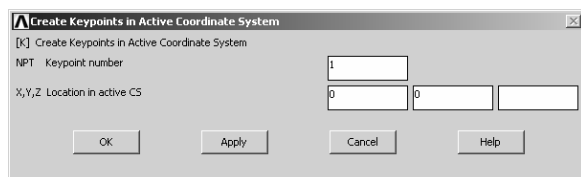


图 6-45 关键点 1

最后，将上述关键点相连形成面。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs，连接所有关键点。

(4) 划分网格

首先，设定划分网格大小控制选项，使用 SmartSize。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→SmartSize→Basic，输入“3”（图 6-46）。



图 6-46 使用 SmartSize

然后，划分网格。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Free，划分网格（图 6-47）。

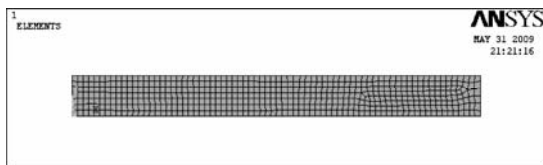


图 6-47 划分网格

(5) 施加电压载荷

下极板为地，上极板为 5V，小缺口不施加电压。选择路径 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage，分别为上下极板施加电压（图 6-48）。

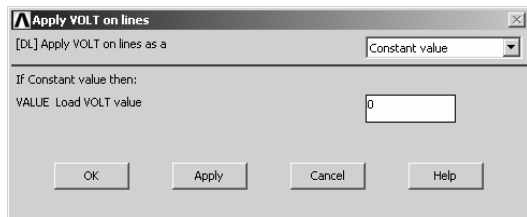


图 6-48 下极板电压

2. 命令流操作

```
/PREP7
```

```
A=1
```

! 定义参数

```

B=0.1
ET,1,PLANE121          ! 定义单元属性
MP,PERX,1,1
K,1                      ! 建立模型
K,2,A
K,3,0,B
K,4,A/2,B
K,5,A/2+B,B
K,6,A,B
A,1,2,6,5,4,3
SMRTSIZE,3              ! 划分网格
AMESH,ALL
DL,1,,VOLT,0             ! 施加电压载荷
DL,3,,VOLT,5
DL,5,,VOLT,5
FINISH

```

6.4 求解

求解是 ANSYS 计算模型的过程，求解之前用户可以选择求解方法。这里首先介绍电磁场常用的几种求解方法，然后介绍如何求解。

6.4.1 选择求解方法

ANSYS 程序中有几种解方程的方法：稀疏矩阵法（Sparse Solver）、波前法（Frontal Solver），雅可比共轭梯度法（JCG），不完全分解共轭梯度法（ICCG），预条件共轭梯度法（PCG）等。默认为稀疏矩阵法。前两者为直接消去法，后面的都是迭代法（具体求解方法参见表 6-1）。

表 6-1 求解方法

解 法	典 型 应 用	理想模型大小	内 存 需 要	磁 盘 使 用
稀疏矩阵法 (Sparse Solver)	非线性分析要求稳定性和求解速度时。线性分析迭代解法较慢时	10000~500000 自由度（此范围之外仍然运行良好）	1 GB/MDOF	10 GB/MDOF
波前法 (Frontal Solver)	稀疏矩阵法的前身，比其使用更少内存，运行速度慢。对于小型非线性分析十分稳定	小于 0.000 自由度	小于 0.5 GB/MDOF	10 GB/MDOF
预条件共轭梯度法 (PCG Solver)	相对稀疏矩阵法解法减少磁盘 I/O。对于大型三维良好网格模型最佳。ANSYS 中最稳定的迭代求解器	50000 ~ 1000000+ 自由度	MSAVE,ON 时 0.3 GB/MDOF; 没有 MSAVE 时 1 GB/MDOF	0.5 GB/MDOF

续表

解 法	典 型 应 用	理想模型大小	内 存 需 要	磁 盘 使 用
雅可比共轭梯度法 (JCG Solver)	单场（热、磁、声等）分析时最好。使用快速但是简单的预条件法，占用很少内存，不如PCG法稳定	50000~1000000+ 自由度	0.5 GB/MDOF	0.5 GB/MDOF
不完全分解共轭梯度法 (ICCG Solver)	比JCG更精密的预条件法。最好在JCG失败时更复杂情况下使用	50000~1000000+ 自由度	1.5 GB/MDOF	0.5 GB/MDOF

选择求解方法如下：

命令操作：

EQSLV, Lab, TOLER, MULT

Lab：上述求解方法。

TOLER：容差。

MULT：收敛计算时控制最大迭代数的乘数。

菜单操作：

Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options（图 6-49）

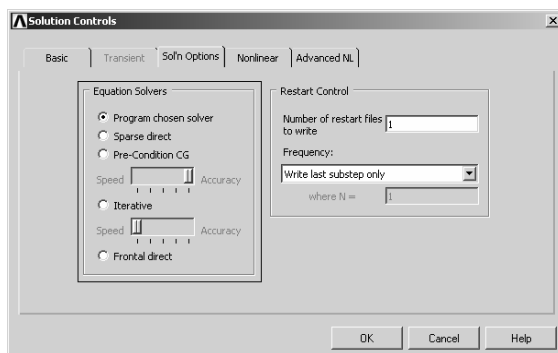


图 6-49 选择求解方法

一般可采用程序自动选择的求解方法（图 6-49）。

6.4.2 开始求解

1. 磁场

命令操作：

SOLVE

菜单操作：

Main Menu→Solution→Solve→Current LS

对于非线性问题，可采用如下方法。

命令操作：

MAGSOLV, OPT, NRAMP, CNVCSG, CNVFLUX, NEQIT, BIOT, CNVTOL

菜单操作：

Main Menu→Solution→Solve→Electromagnet→Static Analysis→Opt & Solv

2. 电场

命令操作：

SOLVE

菜单操作：

Main Menu→Solution→Solve→Current LS

6.5 查看结果

第 2 章和第 3 章介绍过查看结算结果的一些基本方法，这里介绍一些高级方法。

6.5.1 结果查看通用方法

1. 路径点

路径点是模型中某变量沿一个预定义路径取值的图表。产生路径点需要的操作如下所述。

(1) 定义路径

命令操作：

PATH, NAME, nPts, nSets, nDiv

NAME: 路径名称。

nPts: 定义路径所用的点数，大于 2 小于 1000，默认为 2。

nSets: 映射到此路径的数据组的数目。必须指定至少四个：X,Y,Z,S。默认为 30。

nDiv: 相邻节点之间分段数。默认为 20。

菜单操作：

Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path→By Location (图 6-50)

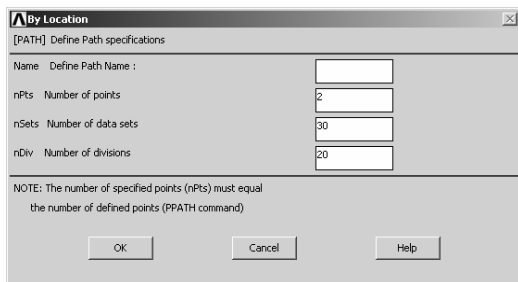


图 6-50 定义路径

(2) 定义路径上的点

命令操作:

PPATH, POINT, NODE, X, Y, Z, CS

POINT: 点数。必须大于 0 且小于等于 PATH 定义的 nPts。

NODE: 定义此点的节点号。如果为空, 则使用 X,Y,Z 坐标定义点。有效的节点号覆盖 X,Y,Z 坐标声明。

X, Y, Z: 点的坐标。

CS: 前一点和此点插值所在的坐标系。

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Path Operation→Define Path→Modify Path (图 6-51)

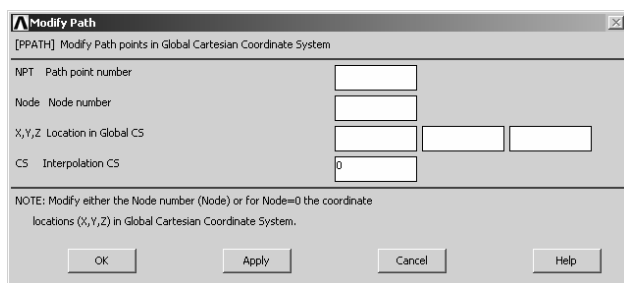


图 6-51 定义路径上的点

(3) 将欲求的量映射到路径

命令操作:

PDEF, Lab, Item, Comp, Avglab

Lab: 路径对象标签。

Item: 插值对象。

Comp: 插值对象组成成分。

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path (图 6-52)

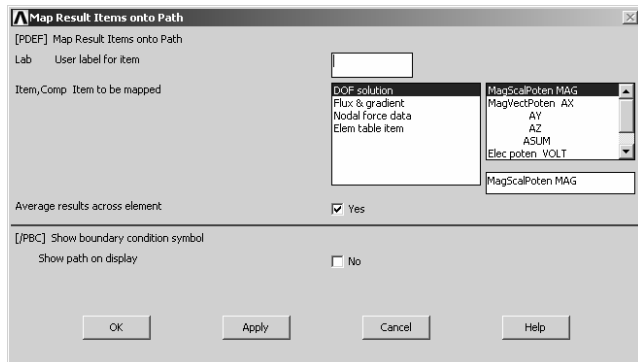


图 6-52 将欲求的量映射到路径

(4) 显示结果

命令操作:

PLPATH, Lab1, Lab2, Lab3, Lab4, Lab5, Lab6

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Items (图 6-53)

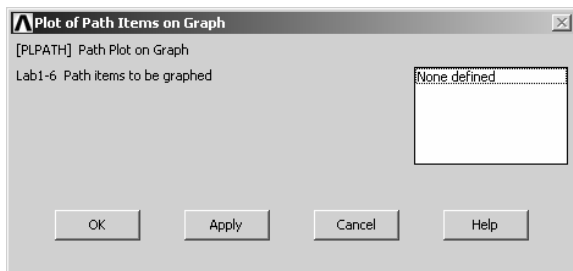


图 6-53 显示结果

2. 带电微粒路径

带电微粒路径图显示带电微粒在电场和磁场中运动的路径。

使用下面操作定义带电微粒路径。

(1) 定义路径起点

命令操作:

TRPOIN, X, Y, Z, VX, VY, VZ, CHRG, MASS

X,Y,Z: 点坐标。

VX,VY,VZ: 点速度。

CHRG: 电荷。

MASS: 质量。

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Flow Trace→Defi Trace Pt

(2) 绘制路径

命令操作:

PLTRAC, Analopt, Item, Comp, TRPNum, Name, MXLOOP, TOLER, OPTION, ESCL, MSCL

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Flow Trace→Plot Flow Tra

磁场中微粒路径如图 6-54 所示; 电场中微粒路径如图 6-55 所示; 电场和磁场同时存在的微粒路径如图 6-56 所示。

3. 面操作

在 POST1 中, 可以将任何节点数据映射到用户自己定义的面上。

定义面操作的方法如下所述。

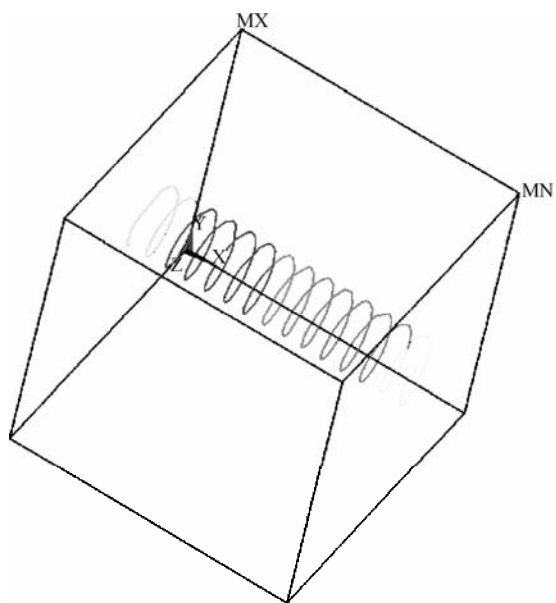


图 6-54 磁场中微粒路径

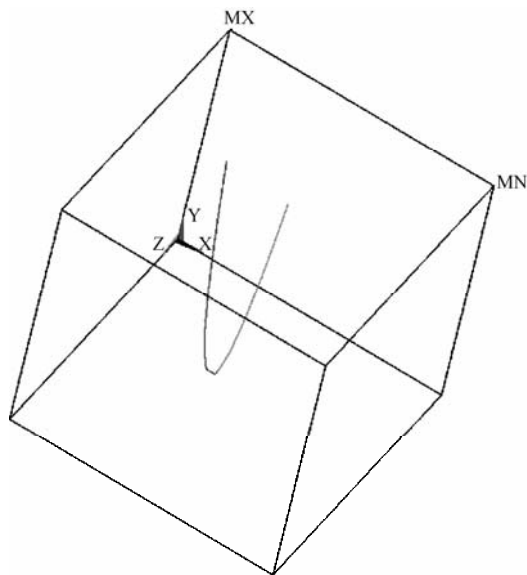


图 6-55 电场中微粒路径

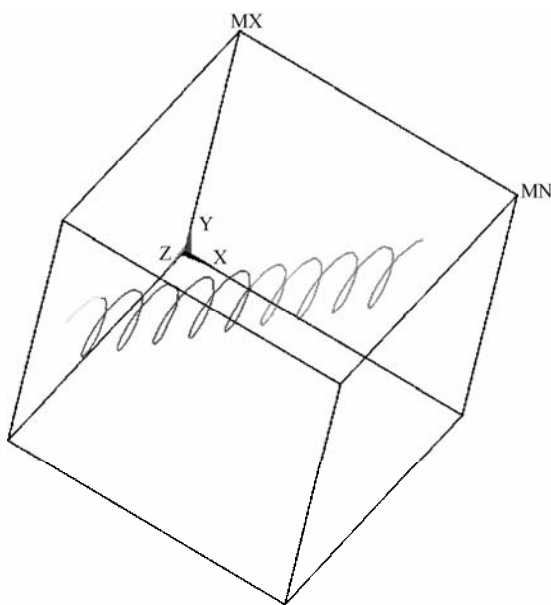


图 6-56 电场和磁场同时存在时的微粒路径

(1) 定义面

命令操作:

SUCR, SurfName, SurfType, nRefine, Radius, blank, blank, TolOut

SurfName: 面名称。

SurfType: 面类型。

nRefine: 面细分程度。

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Create Surface→Inf. Cylinder

Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Create Surface→On Cuttng Plane (图 6-57)

Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Create Surface→Sphere→At Node

Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Create Surface→Sphere→By Dimensions

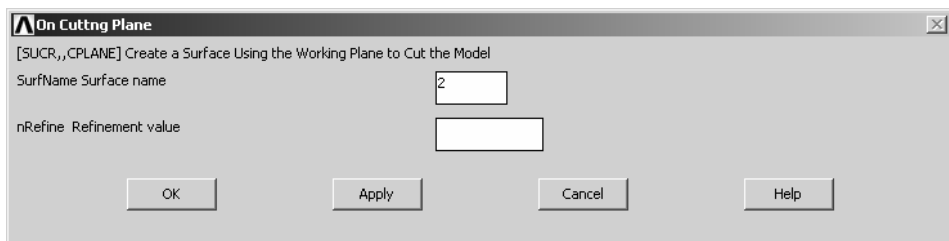


图 6-57 定义切面上的面

(2) 选择映射面

定义完面后, 将数据映射到定义的面。

首先选择面。

命令操作:

SUSEL, Type, Name1, Name2, Name3, Name4, Name5, Name6, Name7, Name8

Type: 选择类型。

Name1, Name2, Name3, Name4, Name5, Name6, Name7, Name8: 面名称。

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Select Surfaces (图 6-58)

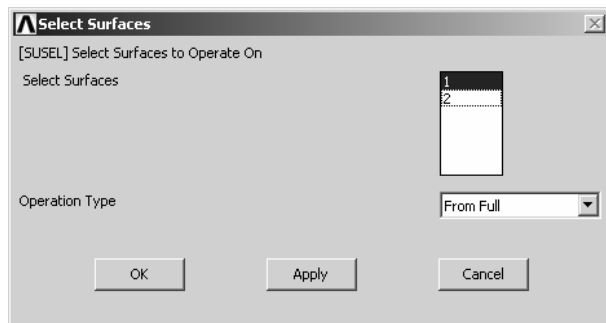


图 6-58 选择面

然后将节点数据映射到选择的面上。

命令操作:

SUMAP, RSetName, Item, Comp

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Map Results (图 6-59)

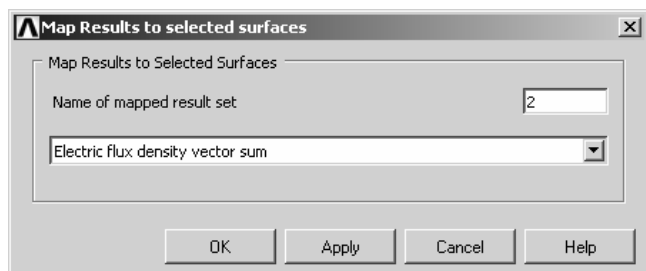


图 6-59 将节点数据映射到选择的面上

(3) 显示面数据

命令操作:

SUPL, SurfName, RSetName, KWIRE

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Plot Results (图 6-60)

实例 6-3 二维带小孔平行板电容求解和查看结果

一个平行板电容, 上极板有一个小缺口, 条件同实例 6-2。求解和查看结果 (图 6-61)。

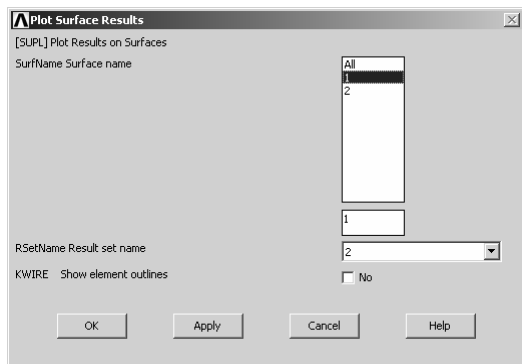


图 6-60 显示面数据

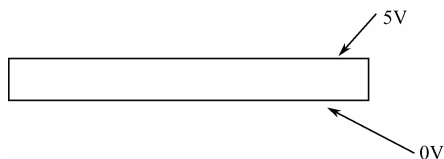
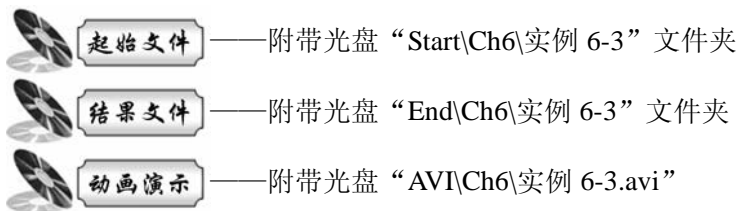


图 6-61 二维带小孔平行板电容



1. GUI 操作

(1) 求解

首先选择全部。选择路径 Utility Menu→Select→Everything。

然后求解, 选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS。

(2) 绘制电场强度

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Contour Plot→Nodal Solution, 在打开的对话框

中选择路径 Nodal Solution→Electric Field→Electric field vector sum (图 6-62)。绘制电场强度的轮廓线如图 6-63 所示。

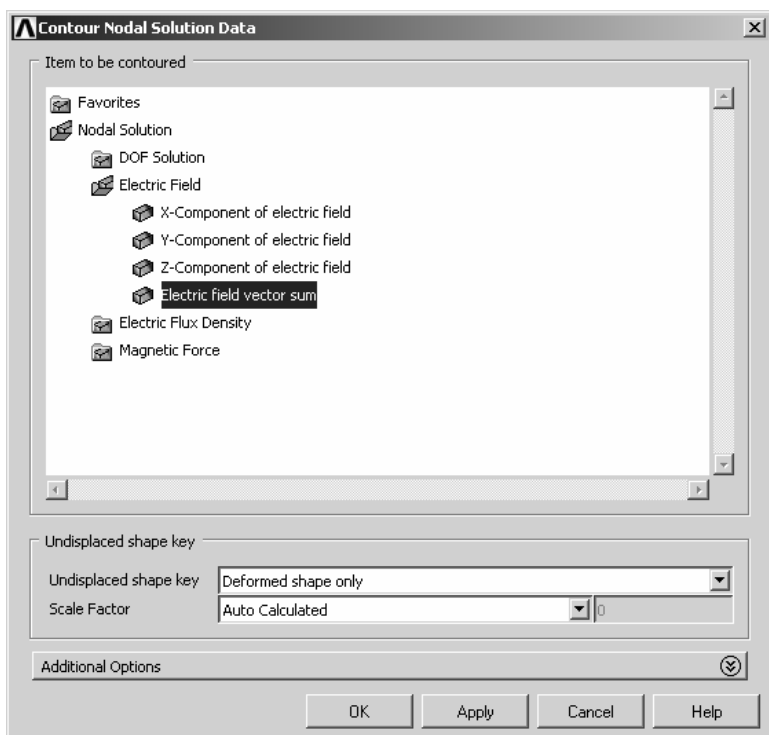


图 6-62 绘制电场强度的轮廓线

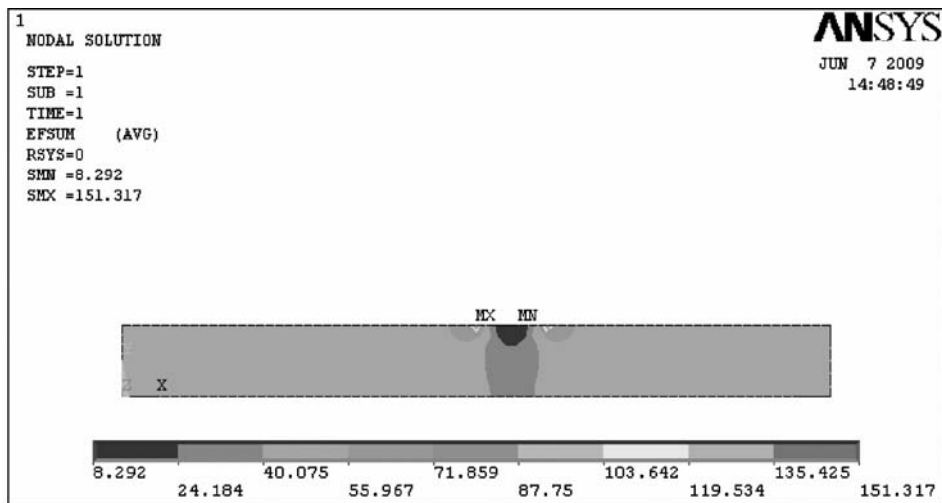


图 6-63 电场强度

(3) 带电微粒路径

选择路径 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Defi Trace Pt, 在坐标 (0,B/2,0) 位置 (图 6-64), 使速度 (5,0,0) 的电荷量为 0.1, 质量为 1 的电荷进入电容 (图 6-65)。

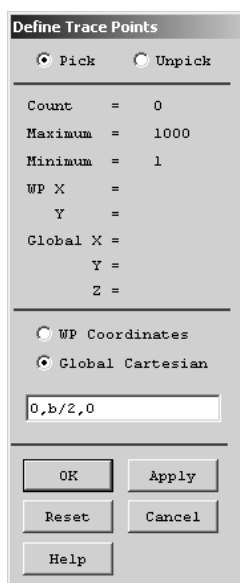


图 6-64 在坐标 (0,B/2,0) 位置

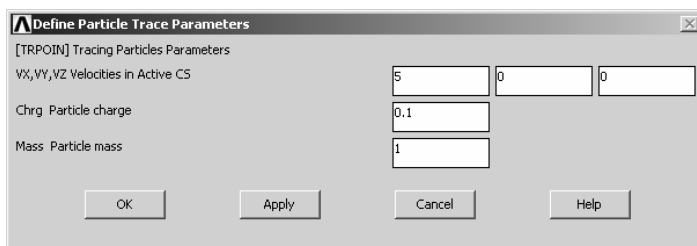


图 6-65 设置速度、电荷和质量

单击“OK”按钮确认后绘制路径，选择路径 Main Menu→General Postproc→Plot Results→PlotParticle Trace，绘制电场中带电微粒路径（图 6-66）。

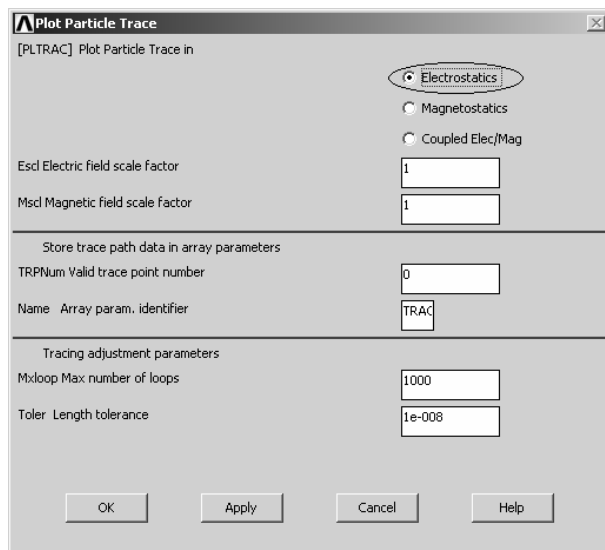


图 6-66 电场中带电微粒路径

2. 命令流操作

```
/SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
```

! 求解

PLNSOL,EF,SUM

! 绘制电场强度曲线

TRPOIN,0,B/2,0,5,0,0,0.1,1

! 带电微粒路径

PLTRAC,ELEC

6.5.2 磁场力

1. 洛伦兹力

程序自动计算所有载流单元上的洛伦兹力，可以使用“PRNSOL,FMAG”操作或其对应菜单操作来列出所有载流单元的洛伦兹力，也可以求其合力。

首先使用定义表格。

命令操作：

ETABLE,tablename,FMAG,X (或 Y)

菜单操作：

Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table

出现单元表数据对话框（图6-67），单击“Add...”按钮添加，出现对话框定义表格（图 6-68），用户可以选择合适对象定义表格。

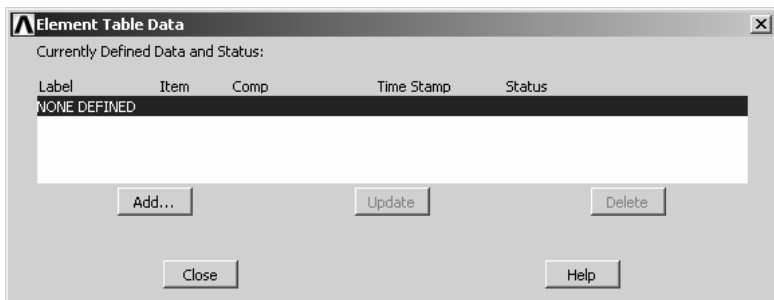


图 6-67 单元表数据对话框

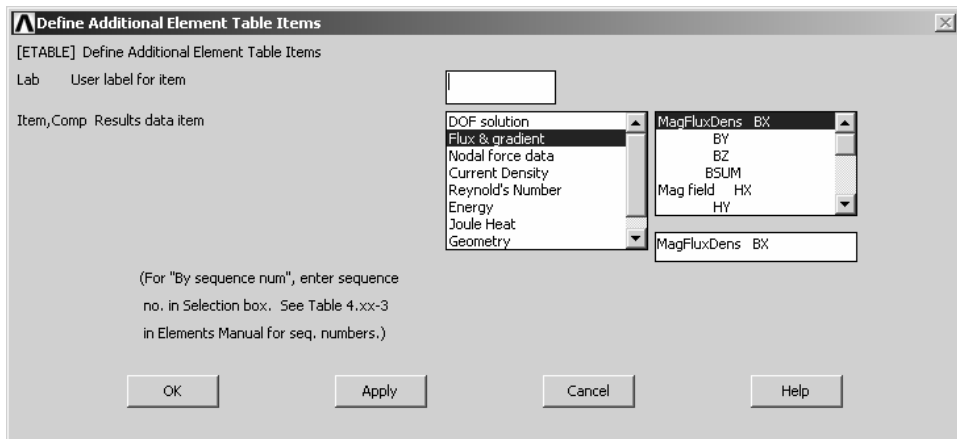


图 6-68 定义表格

然后求和。

命令操作：

SSUM

菜单操作：

Main Menu→General Postproc→Element Table→Sum of Each Item (图 6-69)

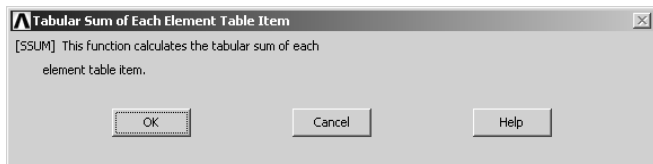


图 6-69 求和

2. 麦克斯韦力

麦克斯韦力在所有标记 MXWF (麦克斯韦面) 面负载的单元计算。计算此力方法如下所述。

命令操作：

PRNSOL, FMAG

菜单操作：

Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution

计算其合力的方法同上述介绍的计算洛伦兹力合力的方法。

3. 虚功力

虚功力在所有标记磁虚位移 (MVDI) 的单元计算。要获取这些力, 选择所有此类单元, 使用下面操作:

命令操作：

ETABLE,tablename,NMISC,snum

菜单操作：

Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table

关于 NMISC 的意义可以在 ANSYS 帮助文件的各个单元文件中查到。

例如, 对于 PLANE13 的虚功力 (表 6-2), 可查到:

表 6-2 PLANE13 的虚功力

输出名称	对象	编号
FVWX (X 方向)	NMISC	3
FVWY (Y 方向)	NMISC	4

将数据移到单元表后, 可以使用 PRETAB 命令或其对应菜单操作列出, 然后使用 SSUM 或其对应菜单操作求和。也可以使用 PLESOL 和 PRESOL 命令或其对应菜单操作, 采用 NMISC 来访问这些数据。

命令操作:

PRETAB, Lab1, Lab2, Lab3, Lab4, Lab5, Lab6, Lab7, Lab8, Lab9

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Element Table→List Elem Table

计算其合力的方法同上述介绍的计算洛伦兹力合力的方法。

6.5.3 查看磁场力矩

磁场力矩查看方法与磁场力查看方法所用的方法极其相似，所以这里只做简单介绍。

1. 洛伦兹力矩

定义力矩单元表方法如下所述。

命令操作:

ETABLE,tablename, snum

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table

列出单元表数据方法如下所述。

命令操作:

PRETAB, Lab1, Lab2, Lab3, Lab4, Lab5, Lab6, Lab7, Lab8, Lab9

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Element Table→List Elem Table

洛伦兹力矩求和方法如下所述。

命令操作:

SSUM

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Element Table→Sum of Each Item

2. 麦克斯韦力矩和虚功力矩

麦克斯韦力矩和虚功力矩的求解过程同洛伦兹力矩的求解过程。如果使用 FMAGBC 将其设定为边界条件，可以使用下面方法。

命令操作:

TORQSUM, Cnam1, Cnam2, Cnam3, Cnam4, Cnam5, Cnam6, Cnam7, Cnam8, Cnam9

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Elec&Mag Calc→Component Based→Torque

实例 6-4 永磁铁求解和查看结果

一个 $A \times B$ 的条形磁铁，条件同实例 6-1（图 6-70）。求解并查看结果。

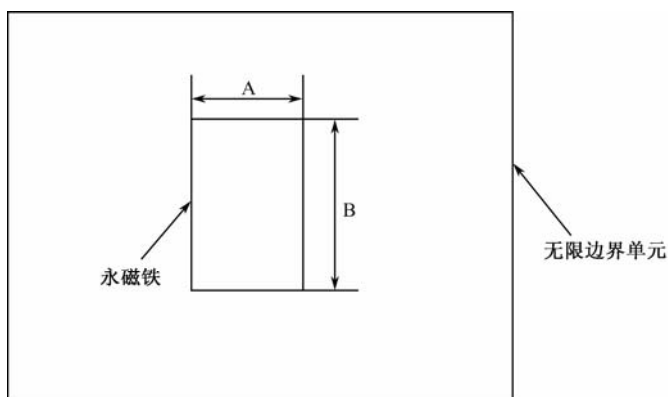





图 6-70 永磁铁

-  **起始文件** —— 附带光盘 “Start\Ch6\实例 6-4” 文件夹
-  **结果文件** —— 附带光盘 “End\Ch6\实例 6-4” 文件夹
-  **动画演示** —— 附带光盘 “AVI\Ch6\实例 6-4.avi”

1. GUI 操作

(1) 求解

首先选择全部，选择路径 Utility Menu→Select→Everything。

然后求解，选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS。

(2) 绘制磁力线

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Flux Lines (图 6-71)，绘制结果如图 6-72 所示。

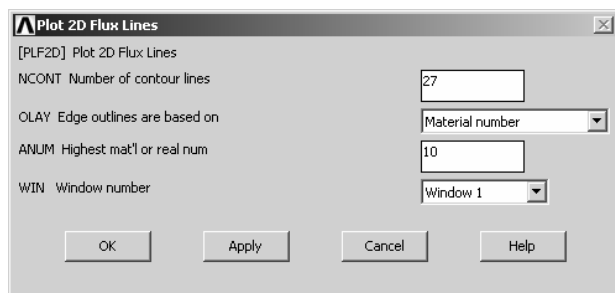


图 6-71 绘制磁力线

(3) 路径点

首先定义路径，选择路径 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path→By Location (图 6-73)，“Name”，“nPts”，“nDiv” 分别填入 “MAG”，“2”，“50”。

单击 “OK” 按钮自动弹出对话框定义路径点。第一个点位置为 $(-C, 0, 0)$ (图 6-74)，第二个点位置为 $(C, 0, 0)$ 。最后单击 “Cancel” 按钮退出。

再选择路径 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path，将物理量映射到路径。“Lab” 填入 “BSUM” 选择 “Flux&gradient”，“BSUM” (图 6-75)。

最后绘制结果，选择路 Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Items (图 6-76)。最后结果如图 6-77 所示。

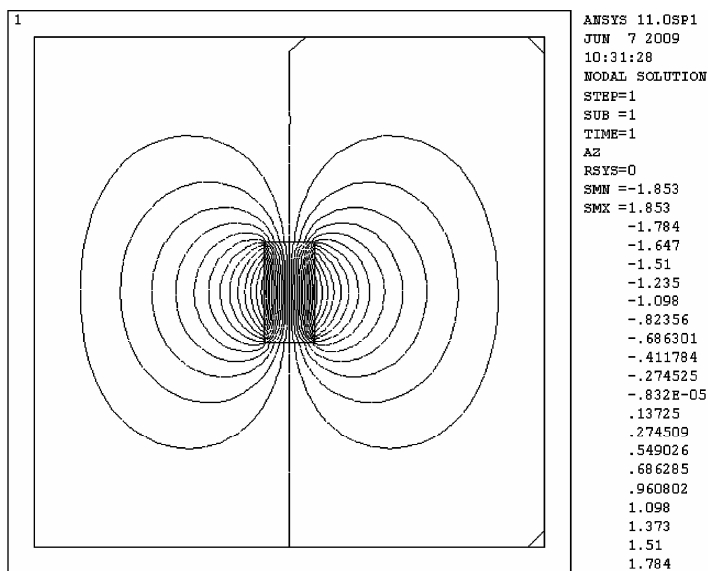


图 6-72 磁力线

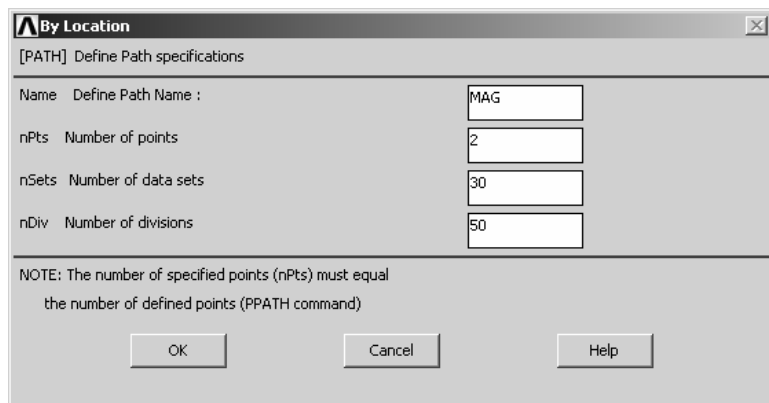


图 6-73 定义路径

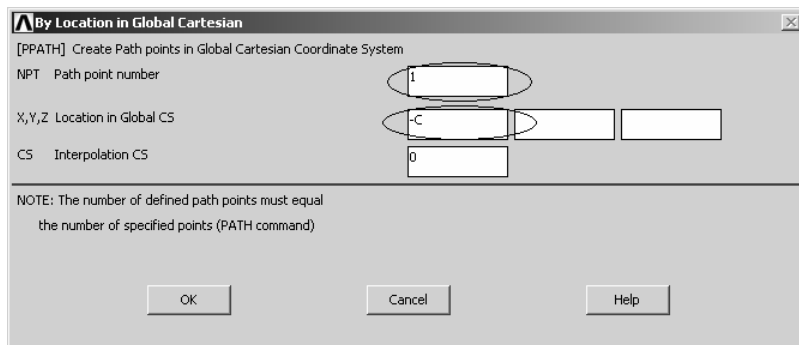


图 6-74 定义路径点

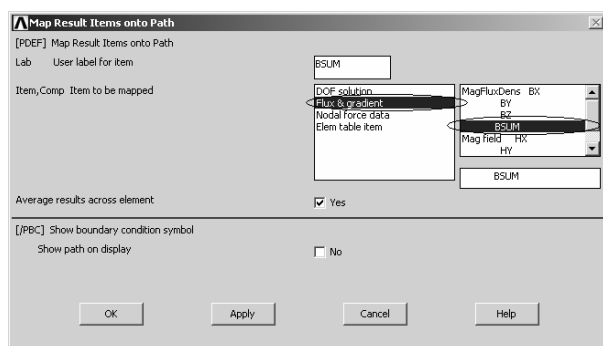


图 6-75 物理量映射到路径

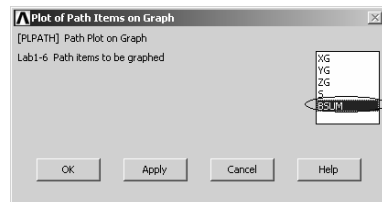


图 6-76 绘制结果

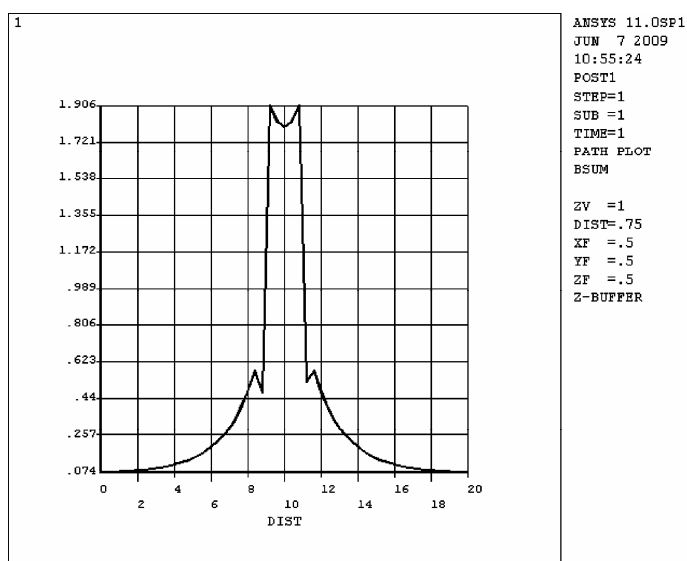


图 6-77 BSUM

2. 命令流操作

```

/SOLU                                ! 求解
ALLSEL,ALL
SOLVE

FINISH

/POST1
PLF2D                                ! 绘制磁力线
PATH,MAG,2,,50                       ! 路径点操作
PPATH,1,,-C
PPATH,2,,C
PDEF,BSUM,B,SUM
PLPATH,BSUM

```

6.5.4 从多导体系统中提取电导率

电场分析一个重要参数就是电导率。对于多导体系统，涉及提取自导和互导，这样等效的集总导体可以应用在电路仿真中。其步骤如下所述。

1. 建立和网格化电场单元

导体看成是理想导体，所以不需要划分导体区域的网格，只要划分其他区域即可。

2. 建立组件

选择导体表面节点，将它们组合建立节点组件。

命令操作：

CM, Cname, Entity

菜单操作：

Utility Menu→Select→Comp/Assembly→Create Component（图 6-78）

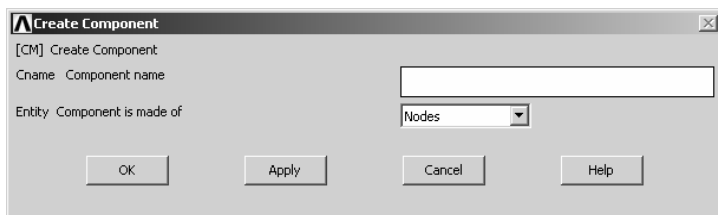


图 6-78 建立组件

进行此操作时，组件名称前缀要相同，然后使用数字值从 1 到最大编号，例如，三个组件命名为“cond1”，“cond2”，“cond3”，最后的组件“cond3”代表地。

3. 进入求解器，选择求解方法

4. 从多导体系统中提取电导率

命令操作：

GMATRIX, SYMFAC, Condname, NUMCOND, --, Matrixname

SYMFAC：对称参数。如果模型没有对称属性，此参数为 1（默认）。如果有，此参数根据模型比例缩放电导率值。

Condname：组件前缀名称。

NUMCOND：组件数目。

菜单操作：

Main Menu→General Postproc→Elec&Mag Calc→Component Based→Self/ Mutual conductance（图 6-79）

使用此操作前不要施加下列类型载荷：

- ① 非零自由度载荷（D,DA 等）。
- ② 非零力载荷（F,BF,BFE,BFA 等）。
- ③ 非零 CE 命令。

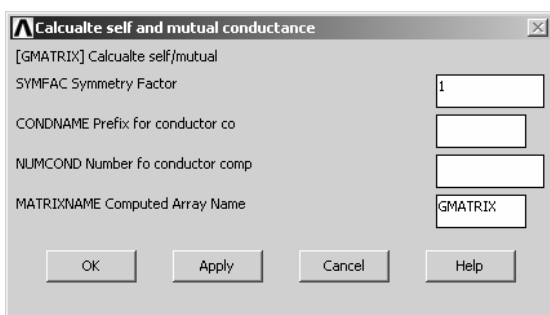


图 6-79 多导体系统中提取电导率

6.5.5 静电场力

用户可以查看静电场力和力矩。

命令操作：

EMFT

菜单操作：

Main Menu→General Postprocessor→Elec&Mag Calc→Summarize Force/Torque

实例 6-5 电导率计算

计算平行板电极自导和互导（图 6-80）。几何参数为

$g=2$

$w=3$

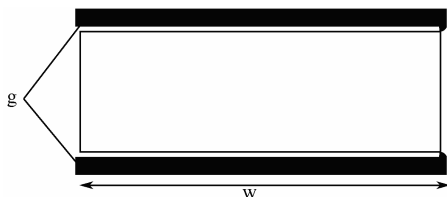


图 6-80 平行板电极



结果文件

——附带光盘“End\Ch6\实例 6-5”文件夹



动画演示

——附带光盘“AVI\Ch6\实例 6-5.avi”

1. GUI 操作

(1) 定义参数

$G=2$

$W=3$

$SIGMA=10$

选择路径 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，输入以上参数（图 6-81）。

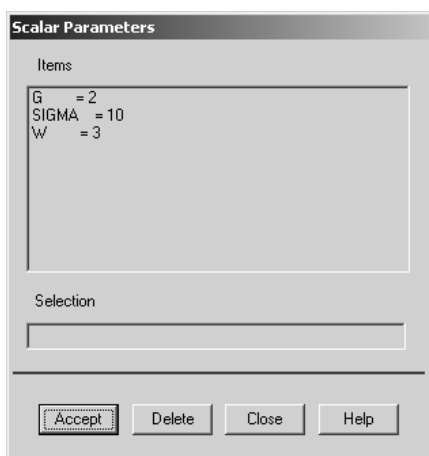
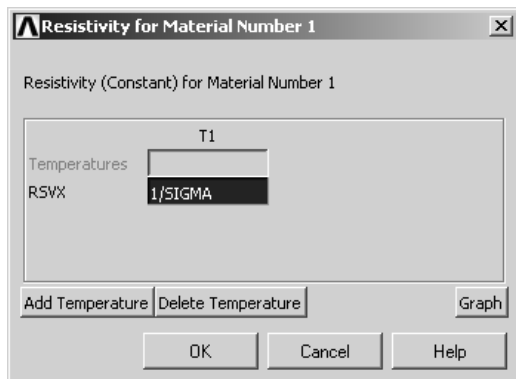


图 6-81 定义参数

(2) 设置属性

首先，定义 PLANE230 单元。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/ Edit/Delete，定义单元。

然后，定义电阻率，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，定义 RSVX 为 $1/\text{SIGMA}$ （图 6-82）。

图 6-82 RSVX 为 $1/\text{SIGMA}$

(3) 建立模型

在点 $(1,0,0)$ ， $(2,W,0)$ ， $(3,W,G)$ ， $(4,0,G)$ 处定义节点，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS，建立以上位置节点。然后连接这四个节点定义单元，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes。

(4) 计算电导率

首先建立组件。先将上部节点组合成一个组件，再将下部节点组合成一个组件。

选择 $Y=G$ 位置的节点。选择路径 Utility Menu→Select→Entities，选择节点（图 6-83）。

然后将这些节点组合为一个组件，命名为 COMP1。选择路径 Utility Menu→Select→Comp/Assembly→Create Component（图 6-84）。

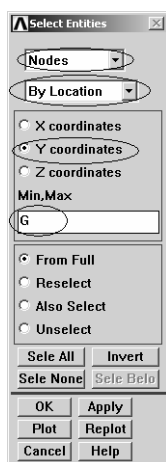


图 6-83 选择 Y=G 位置的节点

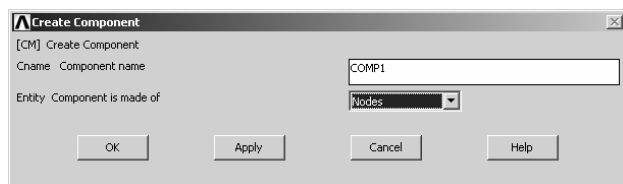


图 6-84 节点组合为一个组件

然后，使用类似操作，选择 Y=0 处节点，建立组件 COMP2。

为了操作方便，在命令输入窗口输入：

```
GMATRIX,1,'COMP',2,0
GC=GMATRIX(1,1,1)
```

得到电导率值为 15。

2. 命令流操作

```
G=2                                ! 定义参数
W=3
SIGMA=10
/PREP7
ET,1,230                          ! 设置属性
MP,RSVX,1,1/SIGMA
N,1,0,0                            ! 建立模型
N,2,W,0
N,3,W,G
N,4,0,G
E,1,2,3,4
NSEL,S,LOC,Y,G
CM,COMP1,NODE                      ! 计算电导率
NSEL,S,LOC,Y,0
CM,COMP2,NODE
NSEL,ALL
GMATRIX,1,'COMP',2,0
GC=GMATRIX(1,1,1)
FINISH
```

6.6 综合实例

实例 6-6 三维带孔电容

一个电容器，极板为正方形，边长为 A ，两极板间距为 B ，介质相对介电系数为 1（图 6-85）。

1. GUI 操作

(1) 设置参数

$A=0.01$
 $B=0.002$
 $R=0.0005$



图 6-85 三维带孔电容

选择路径 **Utility Menu**→**Parameters**→**Scalar Parameters**，输入以上参数。

(2) 建立模型

首先，定义 **PLANE121** 和 **SOLID122** 单元。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Element Type**→**Add/Edit/Delete**，定义单元，单元编号分别为 1 和 2。

然后，定义相对介电常数为 1。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**，单击后打开“Define Material Model Behavior”定义材料模型性质对话框。选择路径 **Electromagnetics**→**Relative Permittivity**→**Constant**，双击打开对话框定义材料 1 的相对介电常数（图 6-86）。

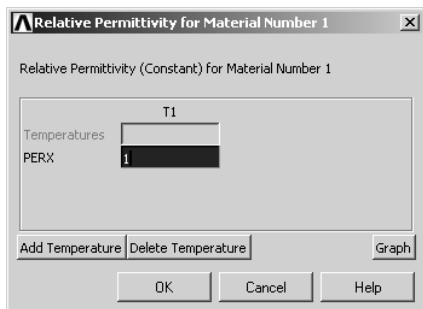


图 6-86 相对介电常数值

然后，建立上极板模型。建立中心为 $(0,0)$ ，边长为 A 的正方形。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Areas**→**Rectangle**→**By Centr & Cornr**（图 6-87）。

然后，再建立半径为 R 的圆。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Areas**→**Circle**→**By Dimensions**（图 6-88）。

将以上两个面重合，选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Operate**→**Booleans**→**Overlap**→**Areas**，重合它们。

然后建立关键点和线，为以后拖拽操作做准备。分别在原点和 $(0,0,B)$ 点建立两个关键点，然后连接它们。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Keypoints**→**In Active CS**，建立关键点。接着选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Lines**→**Lines**→**In Active Coord**，连接这两个关键点（图 6-89）。

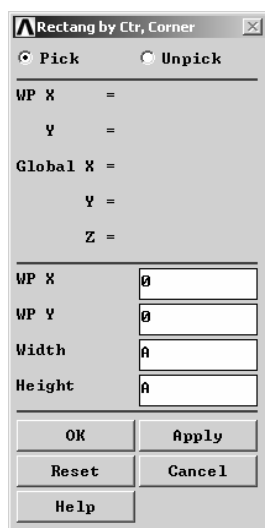


图 6-87 建立正方形

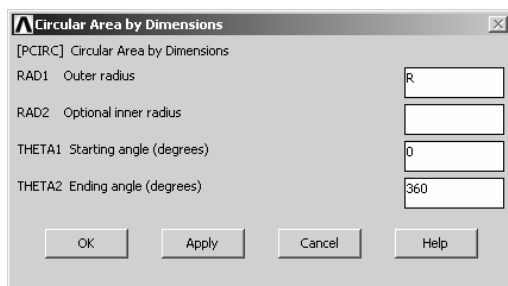


图 6-88 建立半径为 R 的圆

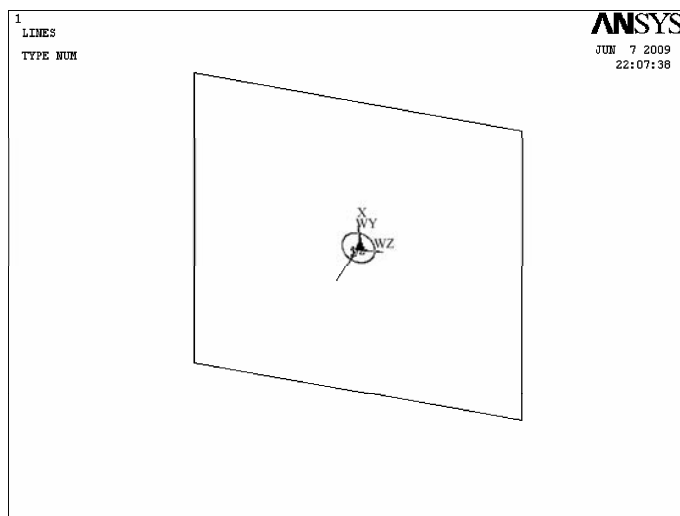


图 6-89 拖拽前的线

(3) 划分网格

打开 MeshTool, 选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool, 分别设定各个选项。首先单元属性选择“Areas”(图 6-90)。单击“Set”按钮设定, 单元属性和材料属性都是 1(图 6-91)。

然后单击“Smart Size”, 选第 4 级(图 6-92)。然后单击“Mesh”按钮划分网格。

(4) 拖拽形成三维模型

选择材料 2, 将线 9 划分为 5 段。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs 选择材料 2。然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines, 将线 9 划分为 5 段(图 6-93)。

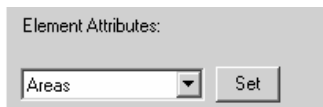


图 6-90 单元属性

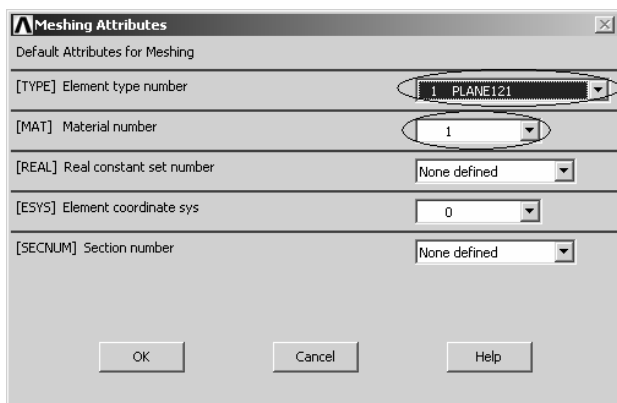


图 6-91 单元属性和材料属性都是 1

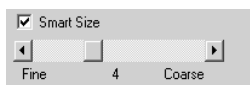


图 6-92 Smart Size

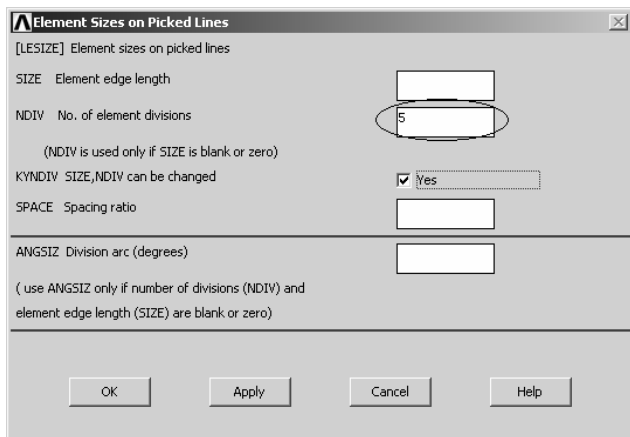


图 6-93 将线 9 划分为 5 段

然后沿线 9 将所有面拖拽形成体。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude→Areas→Along Lines，形成三维模型。

(5) 消除面单元

选择上下极板所在的面，然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Clear→Areas，消除这两个面。

(6) 施加载荷

选择上极板的面 3，施加电压 5V。选择路径 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage→On Areas，对上极板的面 3 施加 5V 电压（图 6-94）。

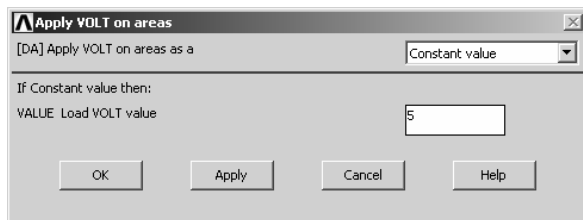


图 6-94 施加电压

然后采用类似操作对下极板施加零电压。

(7) 求解

选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 求解。

(8) 查看结果

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Contour Plot→Nodal Solution，打开的对话框中选择路径 Nodal Solution→Electric Field→Electric field vector sum（图 6-95）。绘制电场强度如图 6-96 所示。

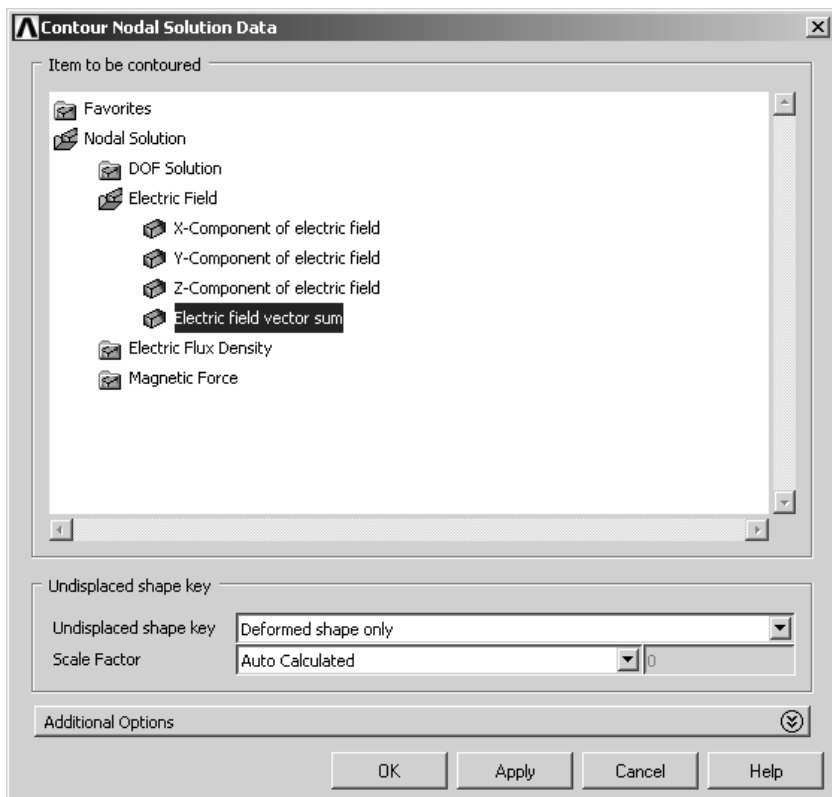


图 6-95 绘制电场强度

然后定义面查看面结果。

选择路径 Utility Menu→WorkPlane→Offset WP by Increments 将工作平面平移到 $Z=2/3*B$ 的位置。然后选择路径 Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Create Surface→On Cutting Plane 建立名称为“ELECEF”的面（图 6-97）。

然后选择路径 Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Select Surfaces 选择此面（图 6-98）。

接着将 EF 的 SUM 部分映射到此面。选择路径 Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Clear Results 映射（图 6-99）。

然后绘制结果。选择路径 Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Plot Results 绘制（图 6-100）。

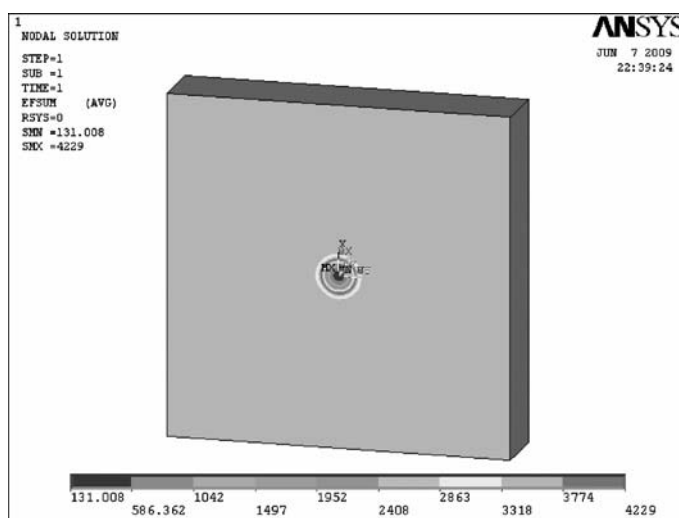


图 6-96 电场强度

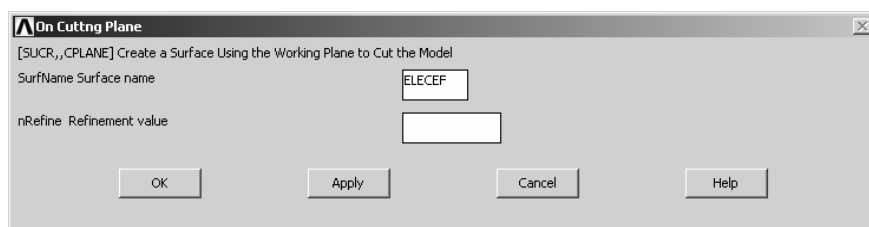


图 6-97 建立面

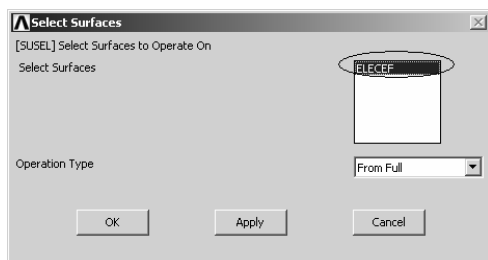


图 6-98 选择此面

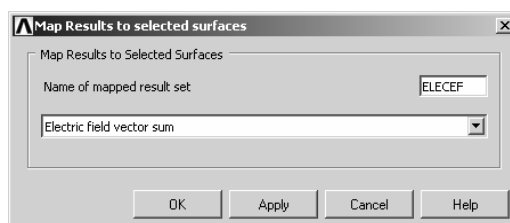


图 6-99 将 EF 的 SUM 部分映射到此面

2. 命令流操作

```
/PREP7
```

```
A=0.01
```

! 设置参数

```
B=0.002
```

```
R=0.0005
```

```
ET,1,PLANE121
```

! 建立模型

```
ET,2,SOLID122
```

```
MP,PERX,1,1
```

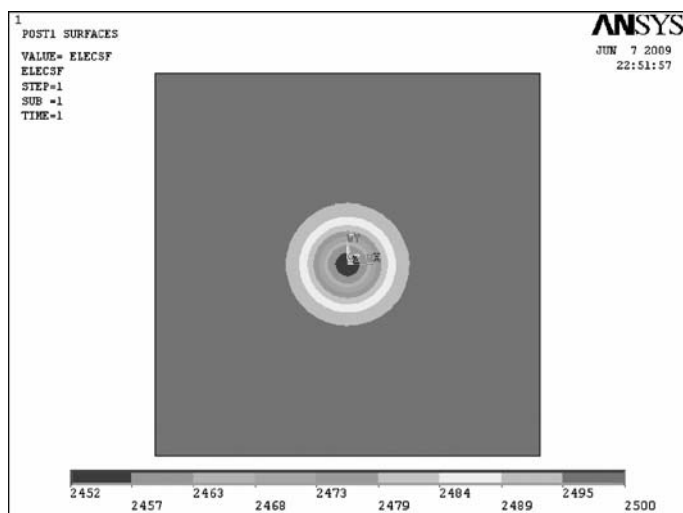


图 6-100 绘制结果

```
BLC5,0,0,A,A
```

```
PCIRC,R
```

```
AOVLAP,ALL
```

```
K
```

```
K,,,B
```

```
L,9,10
```

```
TYPE,1
```

! 划分网格

```
MAT,1
```

```
SMRTSIZE,4
```

```
AMESH,ALL
```

```
TYPE,2
```

```
LESIZE,9,,,5
```

```
VDRAG,ALL,,,,,9
```

! 拖拽形成三维模型

```
ASEL,S,LOC,Z,0
```

! 消除面单元

```
ACLEAR,ALL
```

```
ASEL,S,LOC,Z,B
```

```
ACLEAR,ALL
```

```
ASEL,S,AREA,,3
```

! 施加载荷

```
DA,ALL,VOLT,5
```

```
ASEL,S,LOC,Z,B
```

```
DA,ALL,VOLT,0
```

```
ASEL,ALL
```

```
FINI
```

```
/SOLU
```

! 求解

```
SOLVE
```

```
FINI
```

```

/POST1
PLNSOL,EF,SUM           ! 绘制电场强度曲线
WPOFFS,,,2/3*B          ! 定义面查看结果
SUCR,ELECSF,CPLANE
SUSEL,S,ELECSF
SUMAP,ELECSF,EF,SUM
SUPL,ELECSF,ELECSF
WPCSYS,1,0

```

实例 6-7 双导线系统

两个矩形平行导线，中线距离为 d ，电流方向垂直于纸面，计算两个导体之间的力。参数如下：

```

 $\mu_r = 1$ 
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 
 $d = 0.010 \text{ m}$ 
 $a = 0.012 \text{ m}$ 
 $t = 0.002 \text{ m}$ 
 $I = 24 \text{ A}$ 

```

因为磁场对称性（图 6-101），只要建立 1/4 的模型即可（图 6-102）。远场边界使用无限边界单元划分网格。

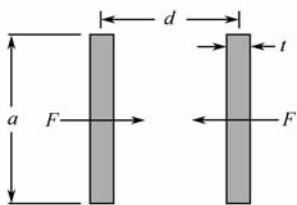


图 6-101 问题模型

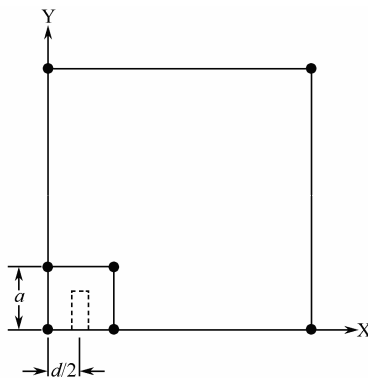


图 6-102 实体模型



起始文件

——附带光盘“Start\Ch6\实例 6-7”文件夹”



结果文件

——附带光盘“End\Ch6\实例 6-7”文件夹”



动画演示

——附带光盘“AVI\Ch6\实例 6-7.avi”

1. GUI 操作

(1) 加载电流负载

首先，选择材料 2。选择路径 Utility Menu→Select→Entities，选择材料 2（图 6-103）。

然后，在导体上施加电流 $1E6$ 。选择路径 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Magnetic→Excitation→AppCurrDens→On Elements，单击“Pick All”按钮（图 6-104），施加电流 $1E6$ （图 6-105）。

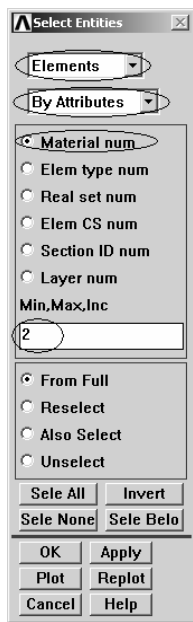


图 6-103 选择材料 2

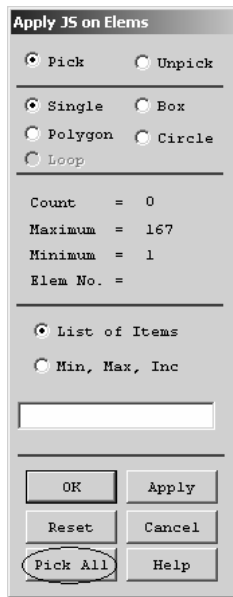


图 6-104 选择全部

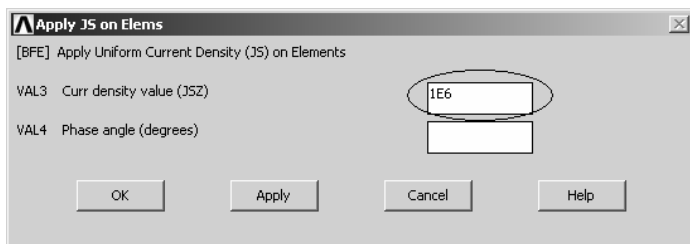


图 6-105 施加电流

然后再选择路径 Utility Menu→Select→Entities，选择选中单元上的所有节点（图 6-106）。

（2）虚功力

选择路径 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Magnetic→Other→AppVirtDisp→On Nodes，在所有选中节点上定义虚位移 1（图 6-107）。

然后在所有其他节点定义虚位移为 0。最后选择全部单元和节点。

（3）求解

选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，求解。

（4）洛伦兹力和虚功力

建立表格，储存洛伦兹力数据和虚功力数据。首先，储存洛伦兹力数据。选择路径 Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table，表格名称为“FMAGX”，选择“Nodal force data”和“Mag force FMAGX”（图 6-108）。

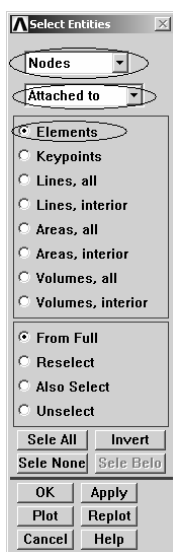


图 6-106 选择选中单元上的所有节点

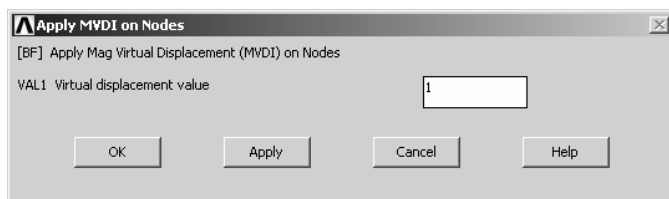


图 6-107 所有选中节点上定义虚位移 1

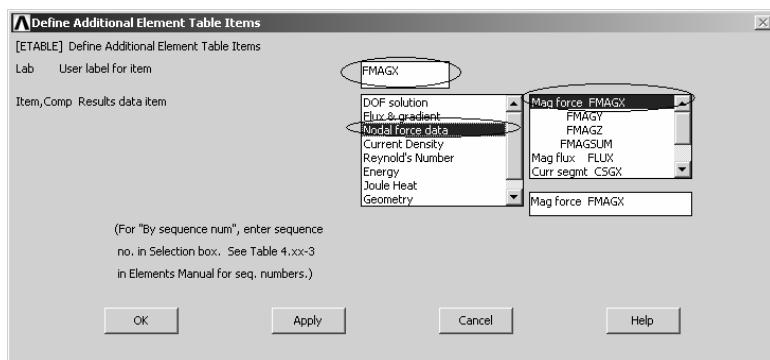


图 6-108 储存洛伦兹力数据

建立名称为“FVWX”的虚功力数据表格。名称为“FVWX”，选择“By sequence num”和“NMISC”，然后输入“3”（图 6-109）。

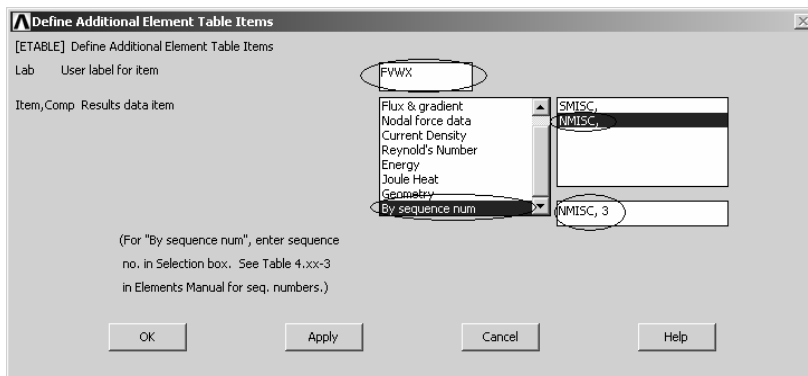
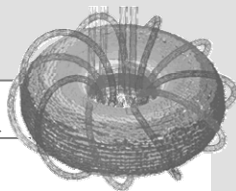


图 6-109 虚功力数据

然后求合力。选择路径 Main Menu→General Postproc→Element Table→Sum of Each Item，得到结果-0.485842E-02。但是因为单元对称性，只建立了部分单元，所以要乘以系数“2”才是最后结果，为-0.9717 E-02。

2. 命令流操作

```
/SOLU
ESEL,S,MAT,,2
BFE,ALL,JS,,1E6           ! 导体上施加电流
NSLE,S
BF,ALL,MVDI,1             ! 虚功位移
NSEL,INVE
BF,ALL,MVDI,0
NSEL,ALL
ESEL,ALL
SOLVE
FINISH
/POST1
ETABLE,FMAGX,FMAG,X       ! 储存洛伦兹力数据
ETABLE,FVWX,NMISC,3       ! 储存虚功力数据
SSUM
FXL=FXL*2                 ! 总洛伦兹力
FXVW=FXVW*2               ! 总虚功力
```

第7章 耦合场分析

耦合场分析是多种工程领域的综合分析，可以解决全局的工程问题，所以用户经常需要使用耦合场分析。当一个场分析的输入决定于另一个场分析的数据时，此分析就是耦合的。

有时分析是单向耦合的，例如，在热应力问题中，热场导致结构场的热应变，但是结构应变一般不会影响温度分布，所以不必在两个场之间迭代计算。但是在电磁耦合计算中，一般都是比较复杂的双向耦合。例如，在压电分析中，要解决由于结构场和电场相互作用导致的电压分布，即由于形变导致的电压分布或反之。



本章内容

- 耦合场分析类型
- 多步载荷
- 直接耦合法
- 多场求解法
- 载荷转移耦合物理场分析



本章案例

- 静电驱动结构
- 静电力驱动悬臂梁
- 带孔半圆壳热电耦合分析
- 微机电系统分析

7.1 耦合场分析类型

耦合场分析的步骤决定于耦合哪些场，可以分为两种不同的方法：载荷转移和直接耦合。还有两种耦合方法，即耦合电流分析和降阶分析。

7.1.1 直接耦合法

直接耦合通常只涉及一个分析，它使用一种耦合场单元，此单元包括所有需要的自由度，耦合只要计算单元矩阵或者单元载荷矢量即可。使用 PLANE223, SOLID226 或 SOLID227 单元的压电分析就是一个直接耦合的例子。

7.1.2 载荷转移法

载荷转移法包括两个或多个分析，每一个都属于一个不同的场。耦合是通过将一个分析的结果作为另一个分析的载荷实现的。几种载荷转移方法如下所述。

1. 多场求解法

ANSYS 多场求解器适用于多种耦合问题，是一种求解载荷转移问题的自动工具，它胜过基于物理场文件的解法，提供一种稳定、精确且简单的解决耦合问题的方法。每一种物理场都独自建模，划分网格。特定的面或体被标记以便耦合载荷转移。

ANSYS 提供两种多场求解器。

① MFS：适用于小型模型，每一个物理场文件都在单一的产品中可解（如 ANSYS Multiphysics）。此方法使用迭代耦合，物理场顺序计算，每个矩阵方程单独计算。此求解器在不同物理场之间迭代计算，直到迭代收敛。

② MFX：增强型的多场求解器，适用于使用多种产品的分析（如 ANSYS Multiphysics 和 ANSYS CFX），它适用于更大的模型。

2. 物理场文件法

此方法需要显式地使用物理场文件转移载荷。用户建立一个场的物理场文件，它包括数据库且准备对一个分析进行网格化。一般的操作是读入第一个物理场文件，然后求解，再读入第二个物理场文件，制定要转移的载荷，然后求解。

7.1.3 ANSYS 分析类型

ANSYS 有多种不同的分析类型，前面大量介绍的都是与时间无关的静态分析，即其负载不随时间变化。其他常用的分析为模态分析、瞬态分析和谐态分析。模态分析用来分析固有频率；瞬态分析用来分析载荷随时间变化的问题；谐态分析用来分析谐载荷下的响应。

选择分析类型的方法如下所述。

命令操作：

ANTYPE, Antype

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→New Analysis（图 7-1）

1. 模态分析

模态分析中定义分析选项如下所述。

命令操作：

MODOPT, Method, NMODE

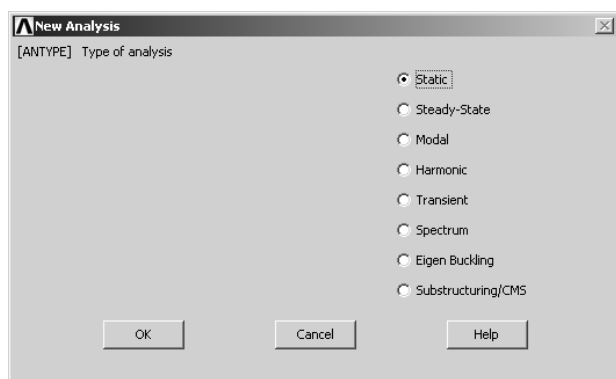


图 7-1 不同的分析类型

Method: 求解方法。

NMODE: 欲提取的模态数目。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Analysis Options

选择模态数如下所述。

命令操作:

SET, Lstep, Sbstep

Lstep: 载荷数。

Sbstep: 模态数。

菜单操作:

Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set

2. 谐态分析

谐态分析中定义分析选项如下所述。

命令操作:

HROPT, Method, MAXMODE, MINMODE, MCOU, Damp

Method: 求解方法。

MAXMODE, MINMODE: 使用的最大和最小模态数目。

菜单操作:

Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options

谐态分析中定义频率范围如下所述。

命令操作:

HARFRQ, FREQB, FREQE

FREQB, FREQE: 频率下限和上限。

菜单操作:

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequec→Freq and Substps

3. 瞬态分析

瞬态分析用来确定时间相关载荷的动态响应。

求解后，进入时间历程后处理器，可以查看时间相关结果。操作如下所述。

命令操作：

```
/POST26
```

菜单操作：

Main Menu→TimeHist PostPro

使用下列步骤绘制结果。

(1) 选择数据

命令操作：

```
NSOL, NVAR, NODE, Item, Comp, Name
```

菜单操作：

Main Menu→TimeHist Postpro→Define Variables

(2) 确定 X 轴和 Y 轴区域

命令操作：

```
/XRANGE, XMIN, XMAX 或/YRANGE, YMIN, YMAX
```

菜单操作：

Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Axes

(3) 定义 X 轴和 Y 轴标签

命令操作：

```
/AXLAB, Axis, Lab
```

菜单操作：

Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Axes

(4) 绘图

可以同时绘制十个变量。

命令操作：

```
PLVAR, NVAR1, NVAR2, NVAR3, NVAR4, NVAR5, NVAR6, NVAR7, NVAR8, NVAR9, NVAR10
```

菜单操作：

Main Menu→TimeHist Postpro→Graph variables

7.2 多步载荷

ANSYS 分析中经常遇到多步载荷问题，这里介绍如何设置载荷、求解及查看。

1. 载荷步

载荷步就是为了求解而做的载荷配置。在稳态分析中，可以使用不同载荷步施加不同载荷：电场力、磁场力，然后第三步载荷步同时施加以上二者。这种载荷步可以看成是空间上的载荷步。第二种是时间上的载荷步，在瞬态分析中，多载荷步依照时间顺序施加载荷（图 7-2）。

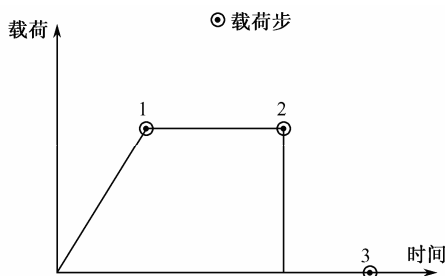


图 7-2 时间上的载荷步

2. 子步

子步是载荷步中求解计算的点。

在稳态分析中，使用子步逐渐施加载荷以得到精确解。在瞬态分析中，使用子步以满足瞬态时间积分规则。在谐态分析中，使用子步以得到频率范围内频率上的解。

设置子步数目的方法如下所述。

命令操作：

NSUBST, NSBSTP

NSBSTP：子步数目。

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Time/Frequenc→Freq & Substeps (or 或 Time and Substps)Main Menu→Solution→Load Step Opts→Sol'n Control (: Basic Tab)Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Freq & Substeps (或 Time and Substps)Main Menu→Solution→Unabridged Menu→Time/Frequenc→Freq & Substeps (或 Time and Substps)

设置子步时间间隔的方法如下所述。

命令操作：

DELTIM, DTIME

DTIME：子步数目。

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time & Time Step Main Menu→Solution→Load Step Opts→Sol'n Control (: Basic Tab)Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time & Time StepMain Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time & Time Step

3. 平衡迭代

平衡迭代是在给定子步的加求解，它只在稳态或瞬态非线性分析中使用。

4. 阶跃载荷和斜坡载荷

阶跃载荷在第一个载荷子步即施加全部值，然后在剩余的载荷步保持恒定（图 7-3）。斜坡载荷则在每个载荷子步逐渐增加，在最后载荷步达到全部值（图 7-4）。

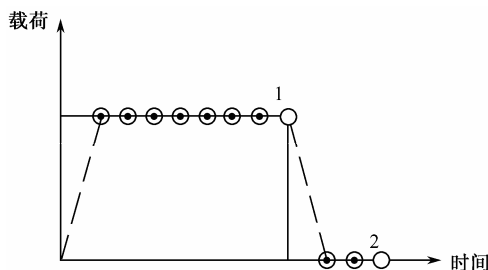


图 7-3 阶跃载荷

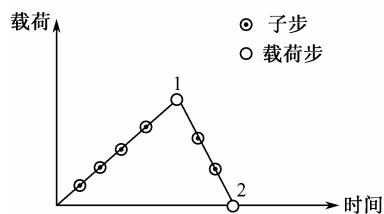


图 7-4 斜坡载荷

选择两种载荷的方法如下所述。

命令操作：

KBC, KEY

KEY：选择载荷类型，0 为斜坡载荷，1 为阶跃载荷。

菜单操作：

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Freq and Substps

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time - Time Step

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time and Substps

5. 时间

ANSYS 使用时间作为所有分析的跟踪参数，不过这些分析不一定是与时间相关。

显然，在瞬态分析或速率相关稳态分析中，时间代表实际的时间。时间在每个载荷步的结尾赋予。

在速率无关分析中，时间则成为一个指示载荷步和子步的计数器。程序默认在第 n 个载荷步末尾指定 $\text{time} = n$ 。任何子步都将根据线性插值施加一个合适的时间值。也可以用户自己设定时间值。

载荷步是在一个时间跨度内施加的载荷。子步是一个载荷步内的时间点，在此求解计算。两个连续子步之差被称为时间步或者时间增量。

命令操作：

TIME

菜单操作：

Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time and Substps Main Menu→Solution→

Load Step Opts→Time/Frequenc→Time - Time Step Main Menu→Solution→Load Step Opts→

Time/Frequenc→Time and Substps Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time /Frequenc→Time - Time Step

ANSYS 不能设定时间为 0，所以，如果想要使分析从 0 时刻开始，那么可以设定从极小的时间开始，如 $1\text{E-}6$ 。

7.3 直接耦合法

直接耦合法使用耦合场单元做只包含一个分析的耦合分析。

7.3.1 使用的单元

此方法使用特定单元进行耦合，所以，了解什么单元可以使用，在什么情况下使用很重要，其具体内容参见表 7-1。

表 7-1 使用的单元

单元名称	说明
SOLID5	耦合场六面体
PLANE13	耦合场四边形
SOLID62	三维磁场-结构场耦合六面体
PLANE67	热场-电场耦合四面体
LINK68	热场-电场耦合线
SOLID69	热场-电场耦合六面体
CIRCU94	压电电路
SOLID98	耦合场六面体
TRANS109	二维机电换能器
CIRCU124	一般电路
TRANS126	一维机电换能器
SHELL157	热场-电场耦合壳
CONTA171	二维面面接触
CONTA172	二维面面接触
CONTA173	三维面面接触
CONTA174	三维面面接触
CONTA175	二维三维节点面接触
PLANE223	耦合场四边形
SOLID226	耦合场六面体
SOLID227	耦合场四面体

7.3.2 直接耦合法分析类型

1. 热场—电场耦合

此分析可以求解如焦耳放热等现象。首先需要设定单元类型和材料属性。对于焦耳放热效应，需要定义电阻（RSVX, RSVY, RSVZ）和热传导率（KXX, KYY, KZZ）等参数。

注意 要使用统一的单位制，例如，如果电流和电压使用安培和伏特，那么电导率单位必须是瓦特/长度，否则输出的热会是瓦特。

2. 压电分析

压电效应是电场和结构场的耦合，是诸如石英的物质的自然特性。在压电物质上施加电压会导致位移，拉伸压电物质也会产生电压。压电分析模型需要相对介电常数、压电矩阵和弹性系数矩阵。

3. 电致弹性

此分析中，电致弹性导致弹性电解质形变。使用的材料属性为杨氏模量（EX,EY,EZ）、泊松比（PRXY,PRYZ,PRXZ 或 NUXY,NUYZ,NUXZ）和相对介电常数。

4. 压阻分析

此现象为物质的电阻率由于机械应力或应变而变化。许多物质有此现象，但是经常在半导体物质中提及。半导体压阻探测单元或者压阻器，常用来作为压力和力传感器，其中的机械载荷转变为正比的电信号。此分析需要的材料属性为电导率、弹性系数和压阻矩阵。

5. 磁场—结构场耦合分析

此分析求解载流导体和磁性物质的磁场力，可以确定形变、应变等物理量。

6. 电场—结构场耦合

此分析包括静电力驱动的机械结构，典型应用是微机电系统（MEMS）。

实例 7-1 静电驱动结构

这是一个 MEMS 结构，由硅制成的梁两端固定构成静电平行板驱动器。平行板驱动器由固定部分和连接在梁上的移动部分组成（图 7-5）。参数参见表 7-2。

表 7-2 梁的性质、平行板驱动器性质

梁 的 性 质	平行板驱动器性质
$L = 150 \text{ } \mu\text{m}$	$A_p = 100 (\text{ } \mu\text{m})^2$
$B = 4 \text{ } \mu\text{m}$	$\text{gap} = 1 \text{ } \mu\text{m}$
$H = 2 \text{ } \mu\text{m}$	$\epsilon_r = 8.854\text{e-}6 \text{ pF}/\mu\text{m}$
$E = 1.69\text{e}5 \text{ } \mu\text{N}/(\text{ } \mu\text{m})^2$	
$p = 2.332\text{e-}15 \text{ kg}/(\text{ } \mu\text{m})^3$	

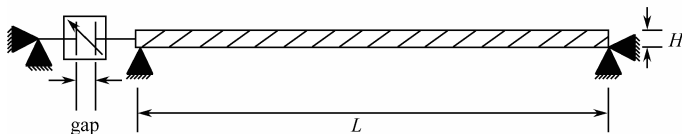


图 7-5 静电平行板驱动器结构

计算下面问题：

- ① 施加 150V 电压到驱动器，计算梁位移；

② 150V 时梁的三个固有频率；

③ 150V 时梁中间施加 $0.1 \mu\text{N}$ 垂直力，计算频率 300 kHz 到 400 kHz 时梁的位移。

模态分析和简谐分析都需要考虑电压载荷，所以需要使用静态分析的结果。



结果文件

——附带光盘 “End\Ch7\实例 7-1” 文件夹



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch7\实例 7-1.avi”

1. GUI 操作

(1) 设定参数

选择路径 Utility Menu → Parameters → Scalar Parameters，设定下列参数：

```
L=150
B=4
H=2
I=B*H**3/12
E=169E3
DENS=2332E-18
PER0=8.854E-6
PLATEA=100
VLT=150
GAPI=1
C0=PER0*PLATEA
```

(2) 建立模型

首先，定义单元 BEAM3 和 TRANS126。

选择路径 Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete 定义单元 BEAM3，同样路径定义 TRANS126（图 7-6），但是需要同时定义 UX VOLT 选项 KEYOPT(3) = 0 或 1，对称选项 KEYOPT(4)=1。单击 “Options...” 按钮弹出选项对话框（图 7-7），K2 选择 “UX-VOLT”，K4 选择 “Constrained”（图 7-8）。

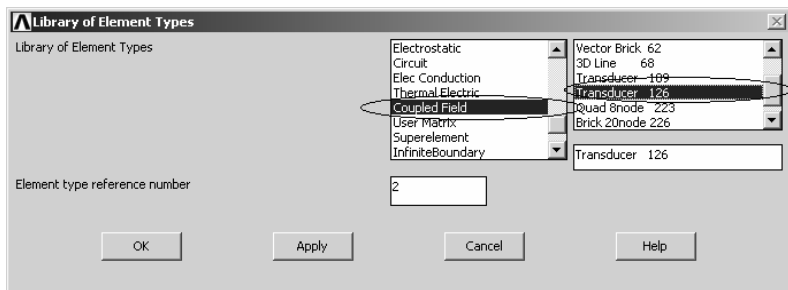


图 7-6 定义 TRANS126

TRANS126 是换能器单元（图 7-9），可以将静电场能量和结构场能量互相转换，也可以存储能量。此单元在每个节点有两个自由度：X,Y,Z 方向的节点位移和节点电压。



图 7-7 单击“Options...”按钮

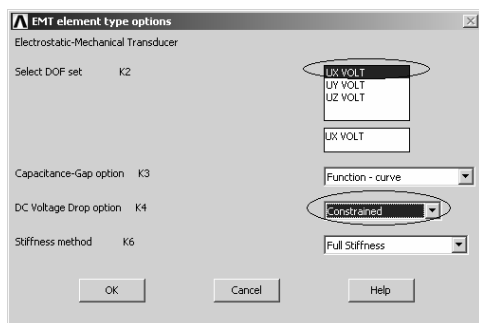


图 7-8 选择 UX VOLT 自由度和对称选项

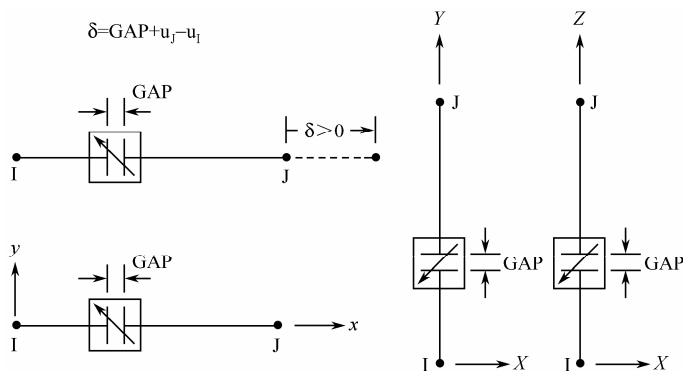


图 7-9 TRANS126

其合适的 UX VOLT 自由度组合如图 7-10 所示。

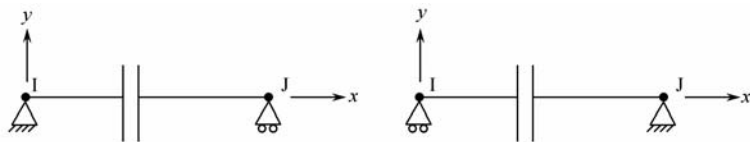


图 7-10 合适的 UX VOLT 自由度组合

其不合适的 UX VOLT 自由度组合如图 7-11 所示。

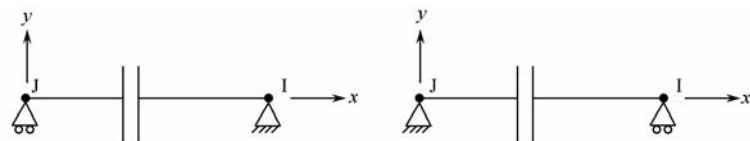


图 7-11 不合适的 UX VOLT 自由度组合

然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，设置材料 1 的杨氏模量为 E，密度为 DENS。

再选择路径 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete，设置实常数，所需 BEAM3 的实常数如下（图 7-12）。

AREA：横截面，此处设置为 B*H。

IZZ: 截面惯性矩, 此处设置为 I 。

HEIGHT: 梁高, 此处设置为 H 。

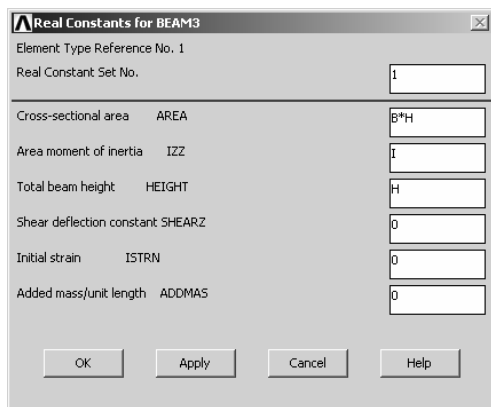


图 7-12 材料 1 实常数

所需 TRANS126 的常数如下。

R3, GAP 即初始间距, 设置为 GapI (图 7-13)。C0 为 C_0 , 为简化操作, 命令输入窗口输入 RMORE,C0。

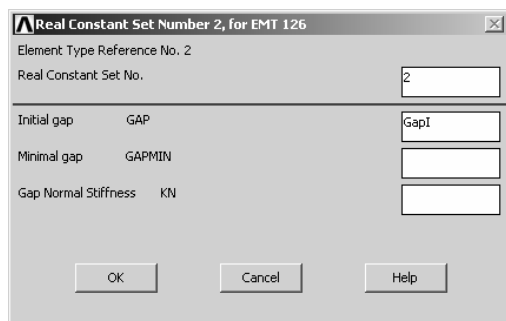


图 7-13 GapI

下面建立有限元模型。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS, 然后选择路径: Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Fill between Nds, 在 $x=-10$ 位置定义节点 1, $x=0$ 定义节点 2, $x=L$ 位置定义节点 22, 填充 2 和 22 节点。

选择单元 2, 实常数 2, 连接节点 1,2 定义单元。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes, 选择单元 2, 实常数 2 (图 7-14)。

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes, 连接节点 1, 2 定义单元, 然后用同样方法, 选择单元 1, 实常数 1, 连接剩余节点建立单元。

(3) 施加边界条件和负载

首先将 $x=-10$ 和 L 的节点, 即第一个和第二个节点的边界条件设为 UX, UY, 方向位移为 0。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→

Displacement→On Nodes (图 7-15)。类似方法, 使 $x=0$ 处节点 UY 位移为 0, 电压为 VLT, $x=-L$ 处节点电压为 0。

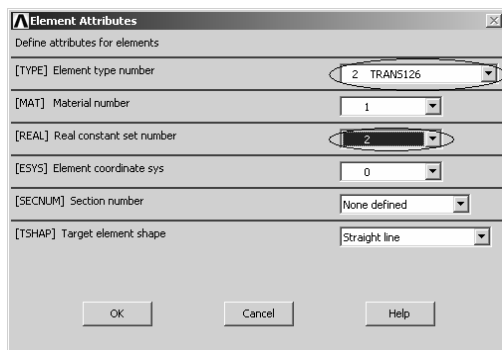


图 7-14 选择单元 2, 实常数 2

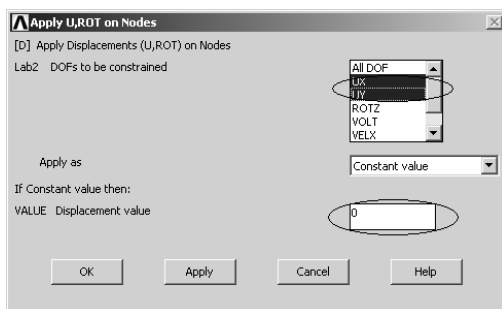


图 7-15 $x=-10$ 和 L 的节点的边界条件

(4) 求解

首先进行稳态分析, 设置预应力。选择路径 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls→Basic (图 7-16), 选择“Small Displacement Static”和“Calculate prestress effects”。

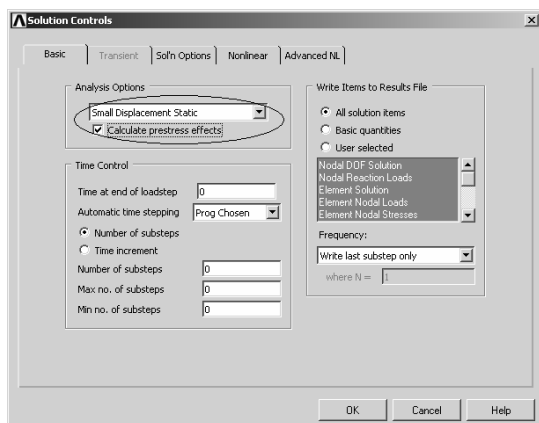


图 7-16 进行稳态分析, 设置预应力

选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 求解。

列出结果。选择路径 Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal Solution，列出 DOF 数据。选择“DOF Solution”中的感兴趣选项，查看结果（图 7-17），如“Electric potential”，如图 7-18 所示。

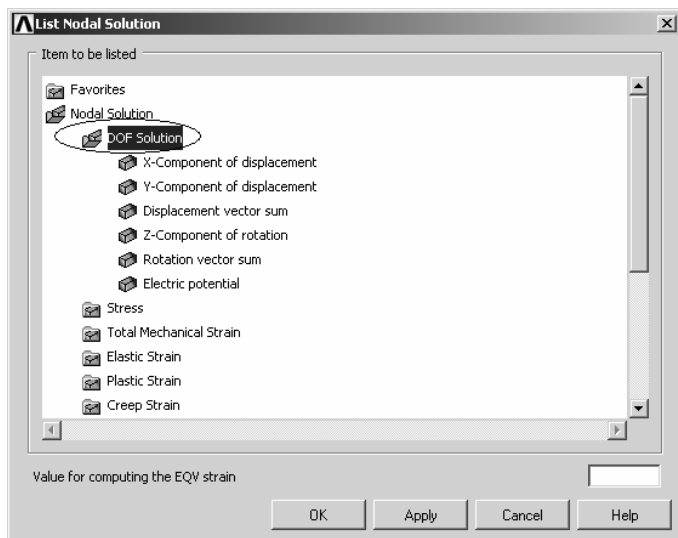


图 7-17 列出结果

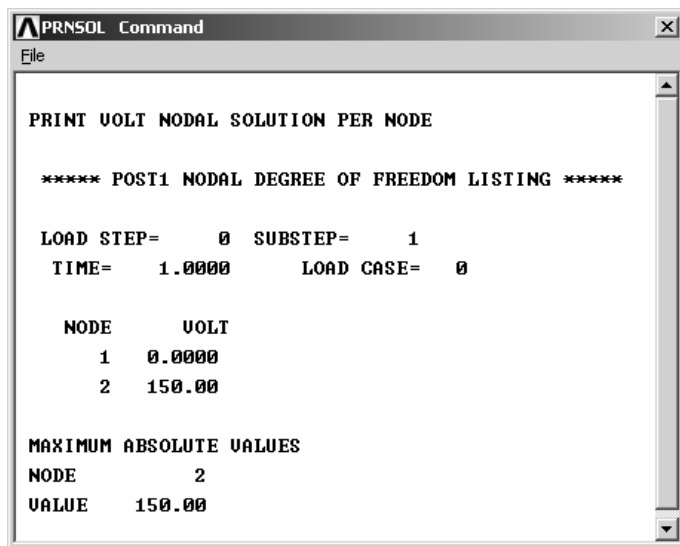


图 7-18 Electric potential

然后进行模态分析。选择路径 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，选择模态分析。然后选择路径 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options，选择“Block Lanczos”，其他设置如图 7-19 所示。

求解，之后查看结果，选择模态 1，载荷 1 绘制变形情况，选择路径 Main Menu→General Postproc→Read Results→First Set，然后选择路径 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape，绘制变形情况（图 7-20）。

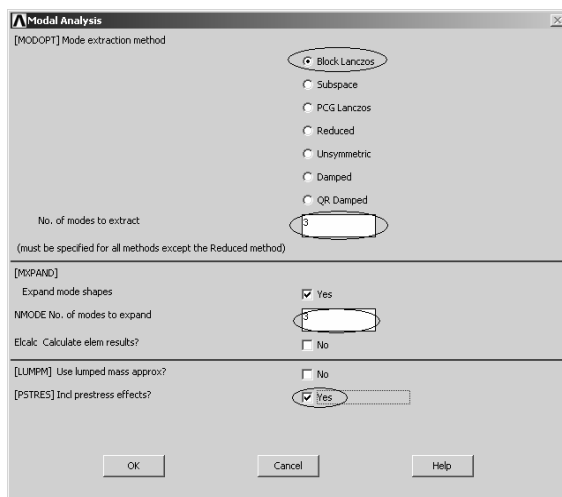


图 7-19 模态分析设置

```

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =1
FREQ=351659
DMX =845335

```

ANSYS
JUN 15 2009
15:53:56



图 7-20 绘制变形情况

2. 命令流操作

```

/PREP7
L=150
B=4
H=2
I=B*H**3/12
E=169E3
DENS=2332E-18
PER0=8.854E-6
PLATEA=100
VLT=150
GAPI=1
C0=PER0*PLATEA
ET,1,BEAM3
R,1,B*H,I,H
MP,EX,1,E
MP,DENS,1,DENS

```

! 定义参数

! 建立模型

```
ET,2, TRANS126,,,,,1
R,2,0,0,GAPI                ! 初始间隙
RMORE,C0
N,1,-10
N,2,0
N,22,L
FILL
TYPE,2
REAL,2
E,1,2
TYPE,1
REAL,1
E,2,3
*REPEAT,20,1,1
NSEL,S,LOC,X,-10            ! 施加边界条件和负载
NSEL,A,LOC,X,L
D,ALL,UX,0,,,,,UY
NSEL,S,LOC,X,0
D,ALL,UY,0
D,2,VOLT,VLT
NSEL,S,LOC,X,-10
D,ALL,VOLT,0
NSEL,ALL
FINI
/SOLU                        ! 求解
ANTYP,STATIC                ! 稳态分析
PSTRES,ON                   ! 打开预应力效应
SOLVE
FINI
/POST1
PRNSOL,DOF                  ! 显示位移和电压
PRRSOL                       ! 显示反作用力
FINI
/SOLU
ANTYP,MODAL                  ! 模态分析
MODOPT,LANB,3
MXPAND
PSTRES,ON
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,1,1
PLDISP,1
```

7.4 多场求解法

这里介绍多场求解法的 **MFS** 方法，它是求解顺序耦合问题的自动工具。此方法的建立基础是每种物理场都是拥有独立模型和网格的场。用户定义面或者体，然后使用多场求解器命令配置此问题，定义求解顺序。求解器自动在不同的网格上转移耦合载荷。其求解步骤在下面介绍。

7.4.1 建立场模型

进行 **MFS** 分析，第一步就是建立模型。唯一的准则就是各个场的模型必须有相同的几何形貌。

7.4.2 标识场界面条件

此步标识面和体界面以使载荷转移。共享相同界面的标识面转移面载荷，共享相同体的标识体转移体载荷。

对于面载荷转移，使用 **SF** 命令族和 **FSIN** 设置面载荷标识。施加场界面标识两次，每次在每个场界面施加。同时，保证每对场界面有唯一的界面参数。使用 **MFSURFACE** 命令指定面载荷转移选项。

设置面载荷标识的方法如下所述。

命令操作：

SF, Nlist, FIN, VALUE

Nlist：节点编号。

VALUE：界面编号。

菜单操作：

Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Field Surface Intr→On Nodes（图 7-21）

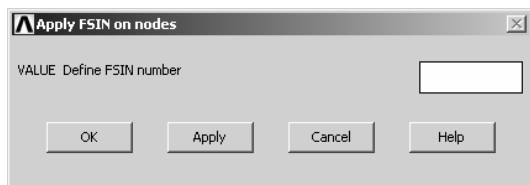


图 7-21 设置面载荷标识

设置面载荷转移的方法如下所述。

命令操作：

MFSURFACE, INUMB, FNUMB1, Label, FNUMB2

INUMB：界面编号。

FNUMB1：发送场编号。

Label：面载荷标识。

FNUMB2：接收场编号。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Interface→Surface (图 7-22)

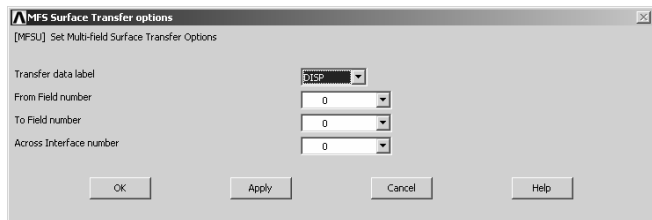


图 7-22 设置面载荷转移

类似的, 对于体载荷转移, 使用 BF 族命令和 MFVOLUME 命令。

7.4.3 场求解

场求解的求解过程如下所述。

1. 定义场和捕捉场求解

(1) 组合单元定义场

命令操作:

MFEM, FNUMB, ITYPE1, ITYPE2, ITYPE3, ITYPE4, ITYPE5, ITYPE6, ITYPE7, ITYPE8, ITYPE9, ITYPE10

FNUMB: 场编号。

ITYPE1, ITYPE2, ITYPE3, ..., ITYPE10: 单元类型编号。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Define→Define (图 7-23)

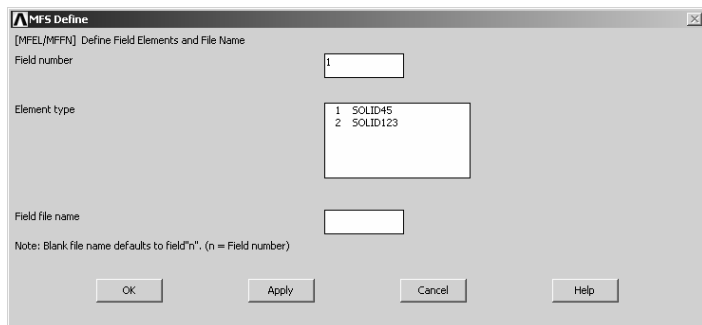


图 7-23 定义场

(2) 为每一个场设定文件名

命令操作:

MFFNAME, FNUMB, Fname

FNUMB: 场编号。

Fname: 文件名。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Define→Define

(3) 捕捉场求解选项

命令操作:

MFCMMAND, FNUMB, Fname, Ext

FNUMB: 场编号。

Fname: 文件名。

Ext: Fname 的后缀名。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Capture (图 7-24)

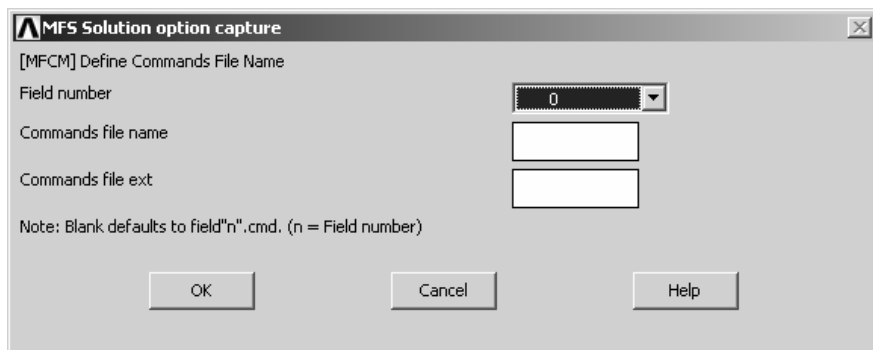


图 7-24 捕捉场求解选项

(4) 为新场求解清除所有求解选项

命令操作:

MFCLEAR

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Clear

2. 设定界面载荷转移

使用 MFSURFACE 命令、MFVOLUME 命令或它们对应菜单操作来设定。

3. 设定全局场求解

(1) 开启多场求解器

命令操作:

MFANALYSIS

Key: ON 或 OFF。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→Select method (图 7-25)

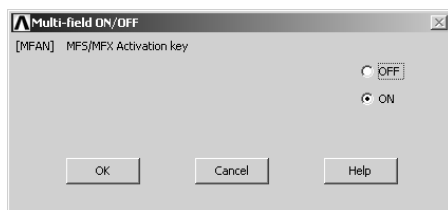


图 7-25 开启多场求解器

(2) 设定载荷转移插值选项

命令操作:

MFINTER, Option

Option: 转移方式。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Setup→Global (图 7-26)

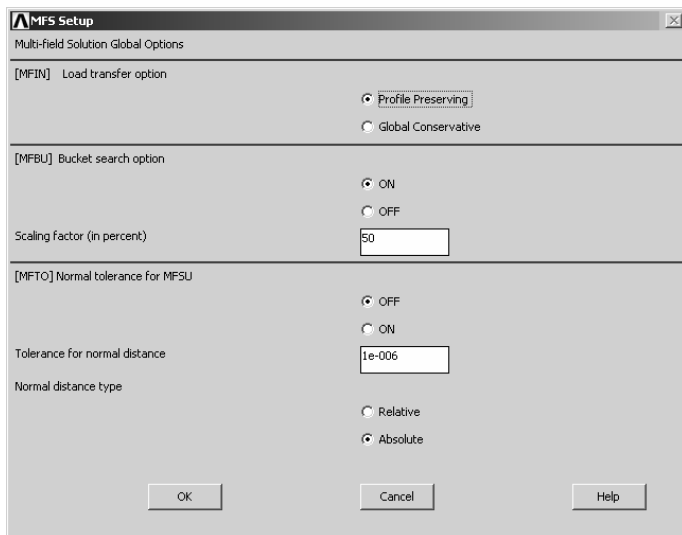


图 7-26 全局选项

(3) 设定场求解顺序

命令操作:

MFORDER

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Setup→Order

4. 设定交错求解

(1) 设定交错迭代次数

命令操作:

MFITER, MAXITER, MINITER, TARGET

MAXITER, MINITER, TARGET: 最多、最少和目标次数。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Stagger→Iterations (图 7-27)

(2) 设定收敛值

命令操作:

MFCONV, Lab, VALUE

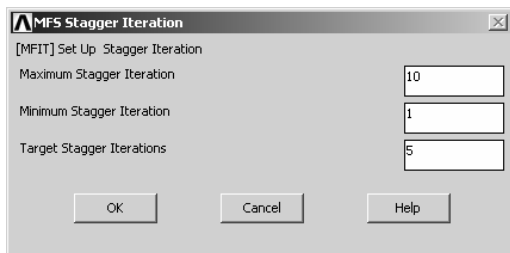


图 7-27 设定交错迭代次数

Lab: 有效对象。

VALUE: 收敛值。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Stagger→Convergence

5. 设定时间频率控制选项

(1) 设定分析结束时间

命令操作:

MFTIME

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Time Ctrl (图 7-28)

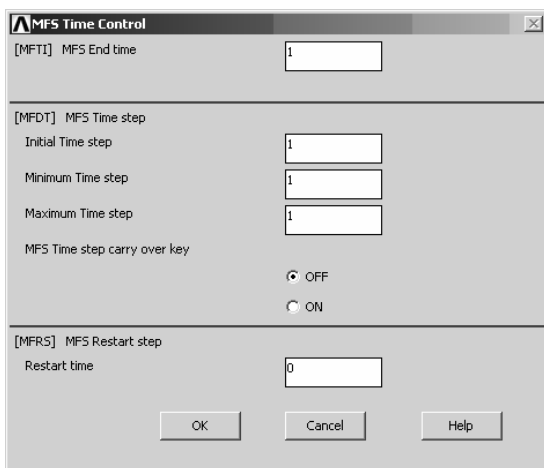


图 7-28 多场求解时间控制

(2) 设定多场仿真时间步长

命令操作:

MFDTIME

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Time Ctrl

(3) 设定场分析时间步长

此步长位于多场分析步长之内, 称为子循环。

命令操作:

DELTIM

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Time/Frequency→Time - Time Step

6. 网格变形

结构场形变会影响周围非结构场。如静电悬臂梁受到电场力发生形变, 这导致静电场变化, 反过来又导致静电力和形变的变化。为了模拟此类行为, 结构场周围的场网格必须与结构形变保持同步。结构场通过 MFSURFACE 命令传递形变给非结构场, 使用 MORPH 命令启用网格变形。

命令操作:

MORPH, Option

Option: ON 或 OFF。

菜单操作:

Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Options→Other→Element Morphing (图 7-29)

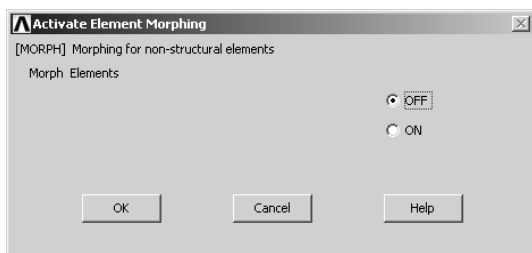


图 7-29 网格变形

实例 7-2 静电力驱动悬臂梁

一个静电力驱动悬臂梁, 用做 RF MEMS 开关, 计算给定电压下其中心形变。静电力会使梁向下弯曲 (图 7-30)。

SOLID45 单元模拟梁。使用半宽模型, 其中对称边界条件施加在对称面。界面标识 FSIN 位于梁底端, NLGEOM 命令用来设定非线性几何。

SOLID123 四面体单元模拟梁下空气, 界面标识 FSIN 位于静电场顶端, 静电场顶端和底端施加电压。

结构场编号为 1, 静电场编号为 2。力从静电场传到结构场, 位移从结构场传到静电场。

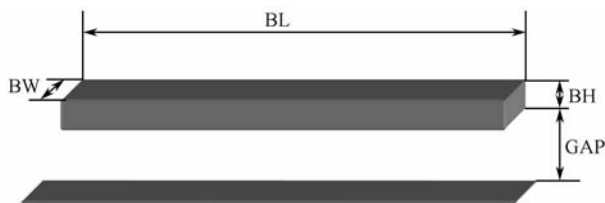


图 7-30 静电力驱动悬臂梁

几何参数如下：

BL=150

BH=2

BW=4

GAP=2



结果文件

——附带光盘“End\Ch7\实例 7-2”文件夹



动画演示

——附带光盘“AVI\Ch7\实例 7-2.avi”

1. GUI 操作

(1) 定义参数

选择路径 **Utility Menu**→**Parameters**→**Scalar Parameters**。定义以下参数：

BL=150

BH=2

BW=4

GAP=2

(2) 结构场模型

第一步 定义单元类型。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Element Type**→**Add/Edit/Delete**，定义单元 SOLID45。

第二步 定义材料属性。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**，分别定义杨氏模量、泊松比、密度为 169E3, 0.066, 2.329E-15。

第三步 建立模型。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Create**→**Volumes**→**Block**→**By Dimensions**，建立 X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2 分别为 0,bl,0,bh,0,bw 的六面体。

第四步 准备划分网格，进行网格划分。沿 BL 方向的线划分为 20 段，沿 BH 方向的线划分为 2 段，沿 BW 方向的线划分为 1 段。然后划分材料 1，单元 1 的模型。选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Meshing**→**MeshTool**，使用 MeshTool 进行网格设置。在“**Element Attributs**”中设置全局选项，单击“**Set**”按钮（图 7-31），单元类型和材料都是 1（图 7-32）。

然后进行线划分设置（图 7-33）。

选择沿 BL 方向的四条线，划分为 20 段（图 7-34）。

使用类似方法将沿 BH 方向的线划分为 2 段，沿 BW 方向的线划分为 1 段。

然后选择“**Volumes**”，“**Hex**”，“**Mapped**”划分网格（图 7-35）。



图 7-31 “Element Attributes”
中设置全局选项

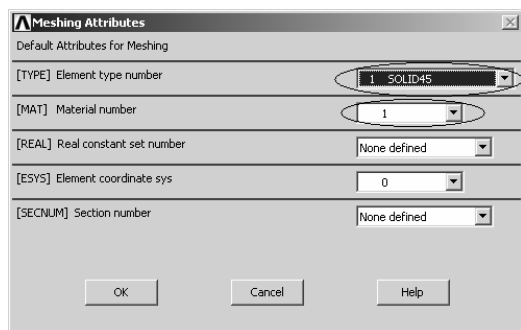


图 7-32 单元类型和材料都是 1

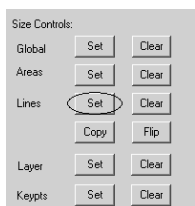


图 7-33 线划分设置

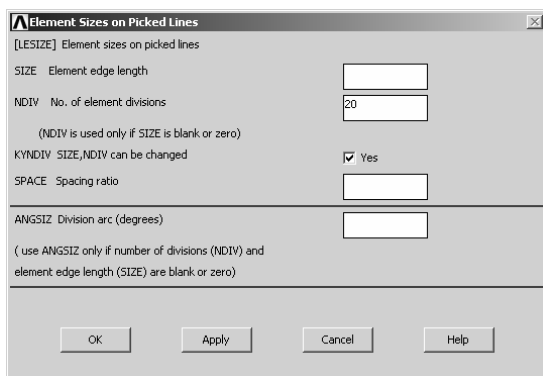


图 7-34 BL 方向的四条线划分为 20 段

第五步 设定边界条件。梁两端使 UX, UY, UZ 均为 0。选择路径 Main Menu → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Areas，设置边界条件（图 7-36）。

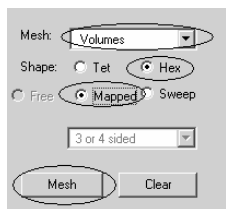


图 7-35 划分网格

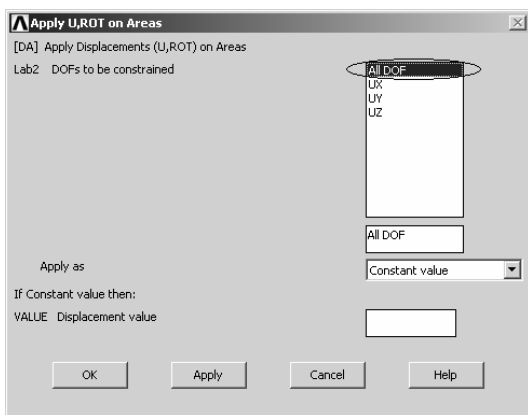


图 7-36 设置边界条件

然后用类似方法设置 $Z=0$ 面 UZ 为 0，此面为对称面。

第六步 设置界面。首先选择 $Y=0$ 的所有节点，然后选择路径 Main Menu →

Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Field Surface Intr→On Nodes, 将这些节点设置界面 1 (图 7-37)。

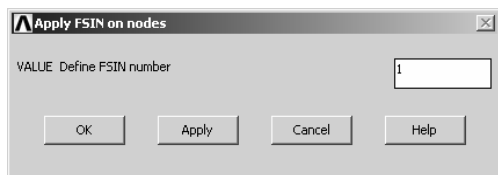


图 7-37 界面 1

(3) 静电场模型

第一步 定义单元类型。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 定义单元 SOLID123。

第二步 定义真空中介电常数。因为采用 μm 单位, 所以需要相应定义此常数。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Electromag Units, 选择“User-defined”(图 7-38), 定义为 $8.854\text{e-}6$ (图 7-39)。

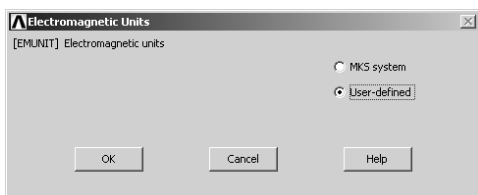


图 7-38 自定义单位制

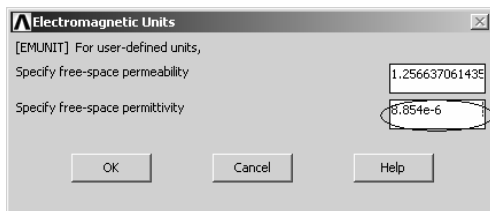


图 7-39 定义为 $8.854\text{e-}6$

第三步 定义材料属性。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models, 定义相对介电常数为 1。

第四步 建立模型。首先开启网格变形 (图 7-40), 然后建立模型。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions, 建立 $X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2$ 分别为 $0, bl, -gap, 0, 0, bw$ 的六面体。

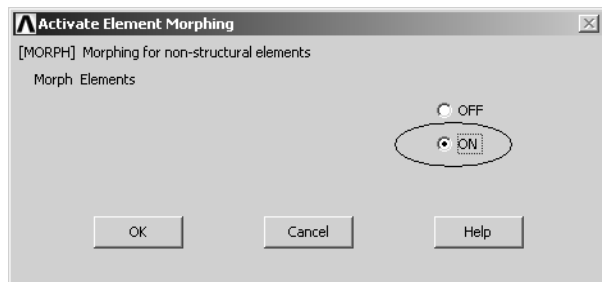


图 7-40 开启网格变形

第五步 划分网格。首先选择体 2, 选择路径 Utility Menu→Select→Entities, 选择体 2。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool, 使用 MeshTool 进行网格设置和网格划分。单元和材料均为 2, SMARTSIZE 设置为 2, 使用四面体, 自由网格划分此体网格 (图 7-41、图 7-42)。

然后设置边界条件。设置空气两端 $UX=0$ ，空气前后面即 $Z=0$ 和 BW 的面 $UZ=0$ ，空气上下面 $UY=0$ 。操作方法与前面介绍的结构场边界条件设置方法相似。再设置其上端面为界面，编号也为 1。

最后加载电压载荷。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage→On Areas，顶端和底端电压分别为 120V 和 0V。

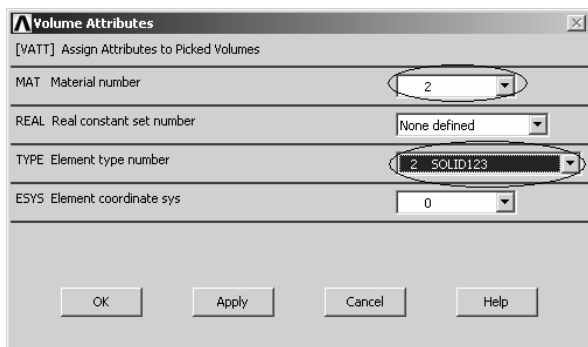


图 7-41 单元和材料均为 2

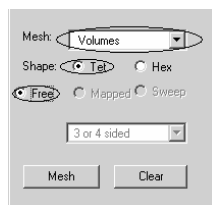


图 7-42 划分网格

(4) 求解

开启多场求解，选择路径 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→Select method，开启多场求解（图 7-43），并选择“MFS Single Code”（图 7-44）。

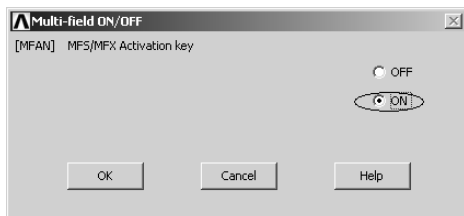


图 7-43 开启多场求解

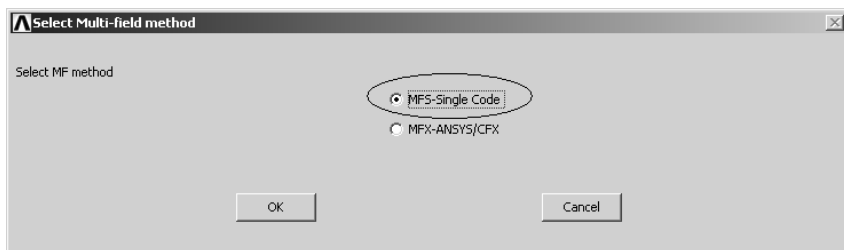


图 7-44 选择“MFS Single Code”

选择路径 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Define→Define，定义结构场编号为 1，静电场编号为 2（图 7-45）。

然后选择路径 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Setup→Order，设定求解顺序。先求解静电场，再求解结构场（图 7-46）。

再选择路径 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Stagger→Convergence，定义所有对象（图 7-47），收敛值为 $1.0e-5$ （图 7-48）。

定义静电场求解选项。

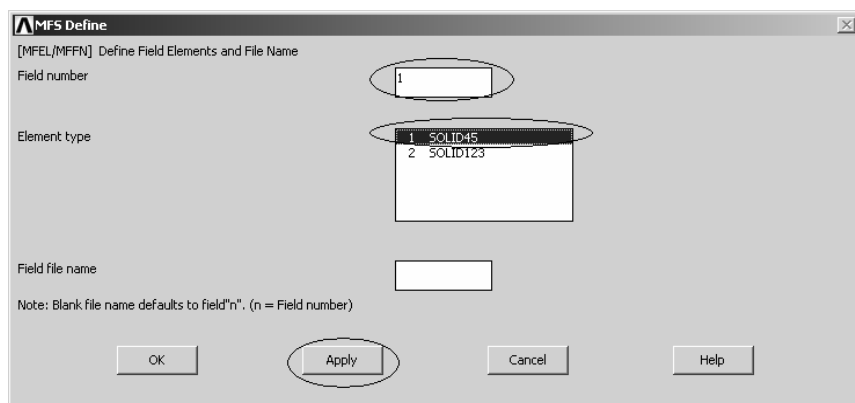


图 7-45 结构场编号为 1

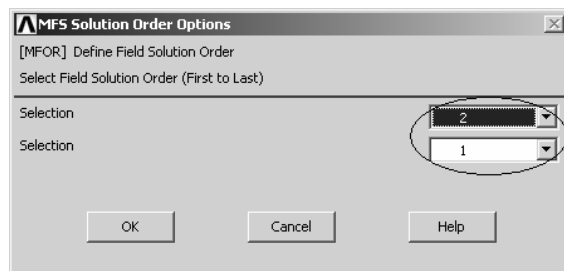


图 7-46 先求解静电场，再求解结构场

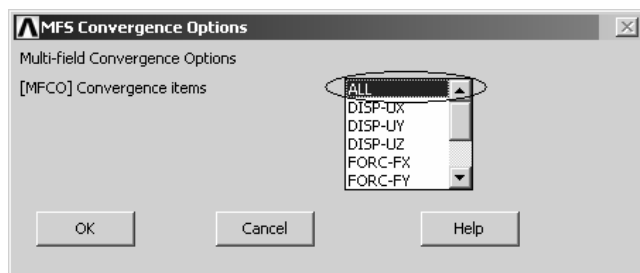


图 7-47 定义所有对象

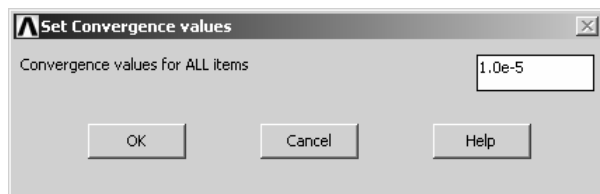


图 7-48 收敛值为 1.0e-5

选择路径 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis，选择稳态分析，然后选择路径 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options，选择方法为 ICCG（图 7-49）。

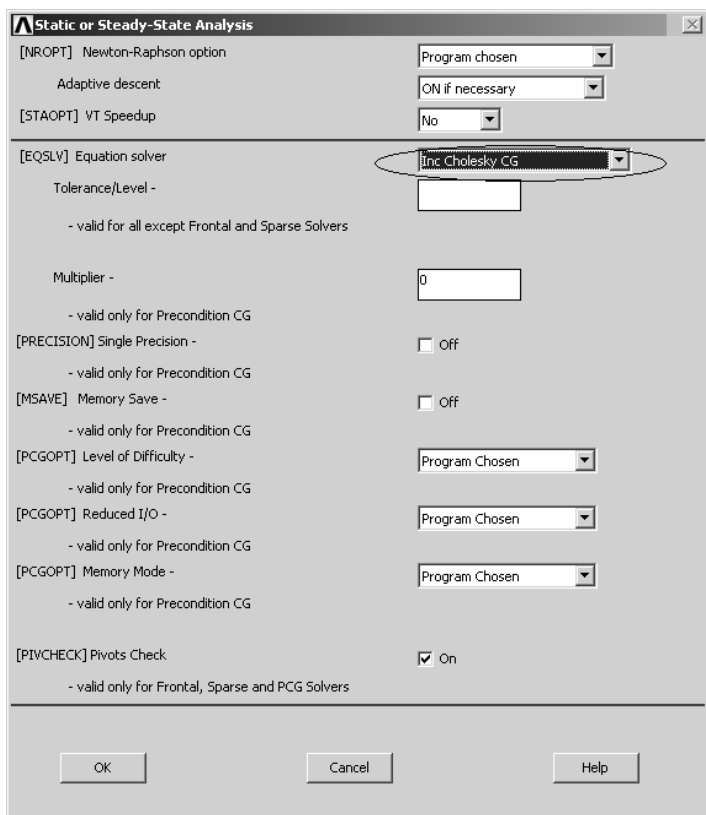


图 7-49 选择方法为 ICCG

接着选择路径 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Other→Element Morphing，开启网格变形。

选择路径 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Capture，捕捉静电场求解选项（图 7-50）。

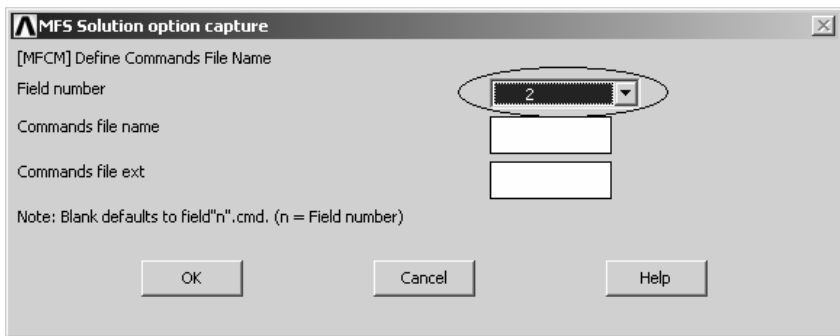


图 7-50 捕捉静电场求解选项

之后定义结构场求解选项。

首先是稳态分析，选择路径 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls→Basic，选择大形变稳态分析选项，时间步长为 10（图 7-51）。

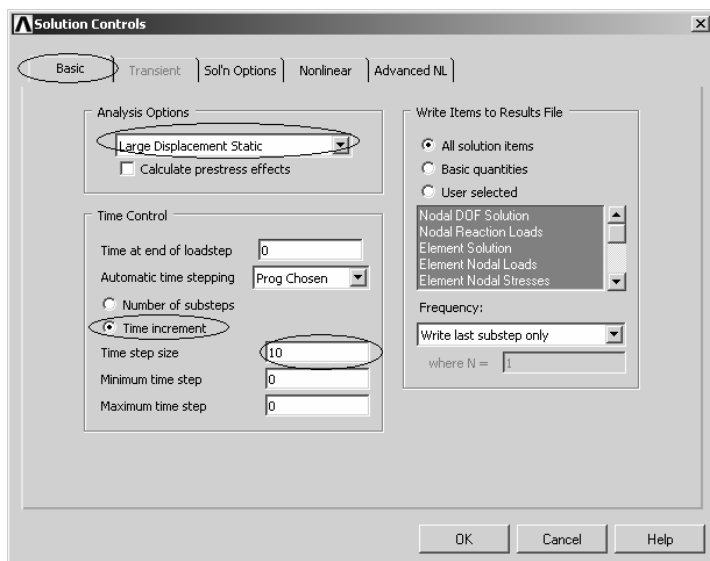


图 7-51 大形变稳态分析

然后关闭网格变化控制，设定负载为斜坡载荷。选择路径 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time - Time Step，选择斜坡负载（图 7-52）。

捕捉结构场求解选项，方法与前面类似。

设定结束时间为 120，步长为 10。选择路径 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Time Ctrl，设置结束时间为 120，步长为 10。（图 7-53）。

选择路径 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Stagger→Iterations，设置最大迭代次数为 20（图 7-54）。

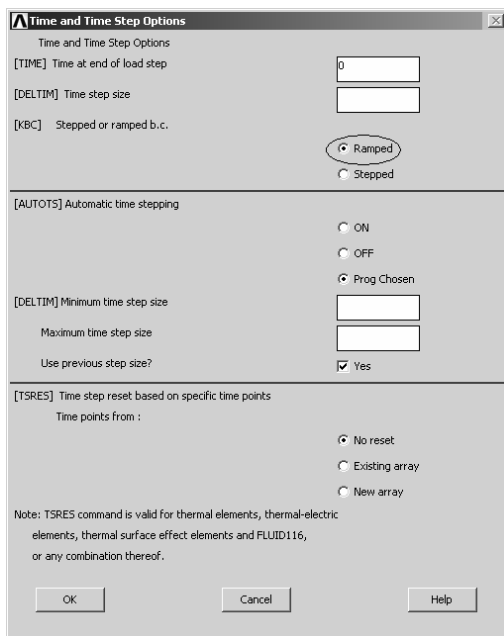


图 7-52 选择斜坡负载

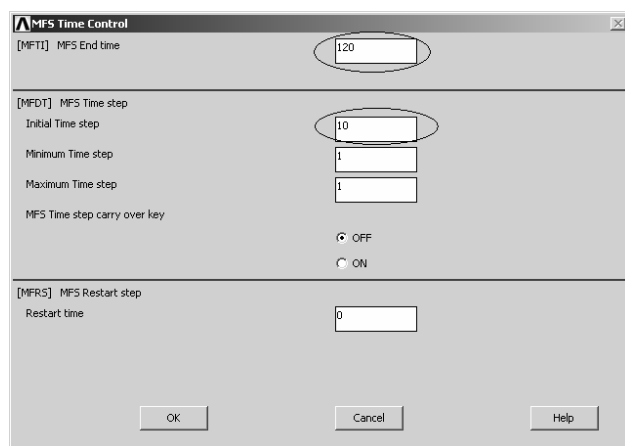


图 7-53 设置结束时间为 120，步长为 10

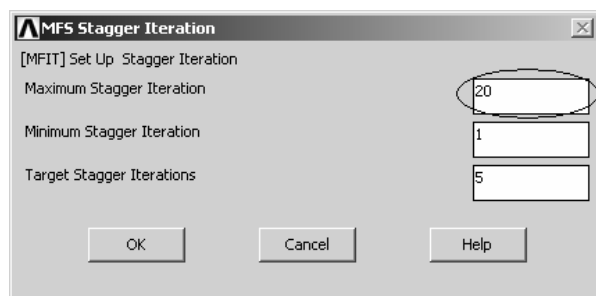


图 7-54 设置最大迭代次数 20

选择路径 Main Menu → Solution → Multi-field Set Up → MFS-Single Code → Setup → Global，设置载荷转移插值选项（图 7-55）。

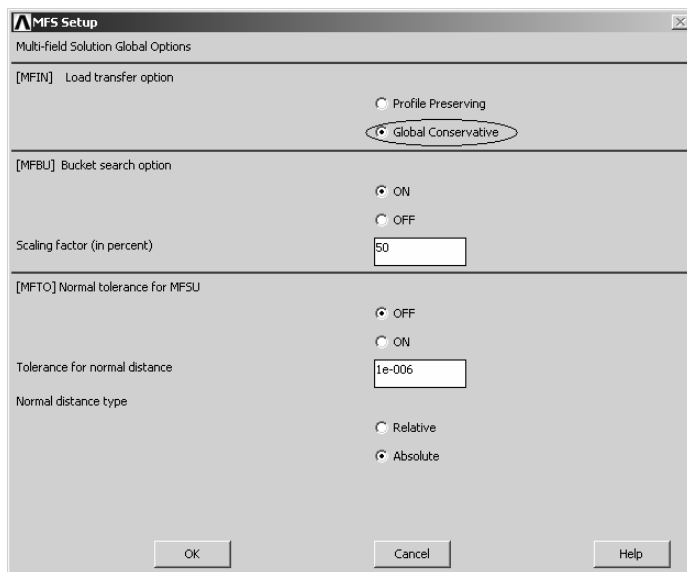


图 7-55 设置载荷转移插值选项

然后，定义力从静电场传到结构场，位移从结构场传到静电场。选择路径 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Interface→Surface（图 7-56）。

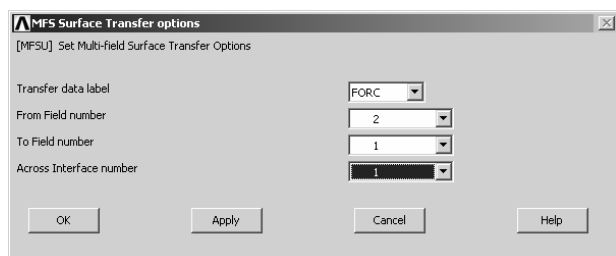


图 7-56 力从静电场传到结构场

最后求解。

(5) 查看结果

选择路径 Main Menu→General Postproc→Data & File Ops，选择静电场结果文件（图 7-57）。

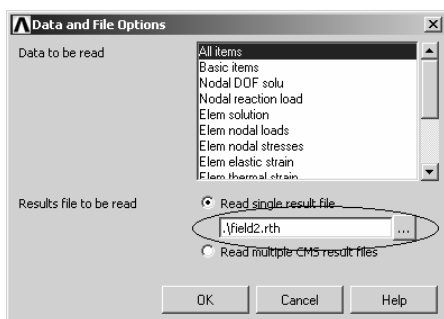


图 7-57 选择静电场结果文件

选择路径 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set，选择最后结果。然后选择单元 2，绘制电场结果。选择路径 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，绘制静电场 EF（图 7-58）。

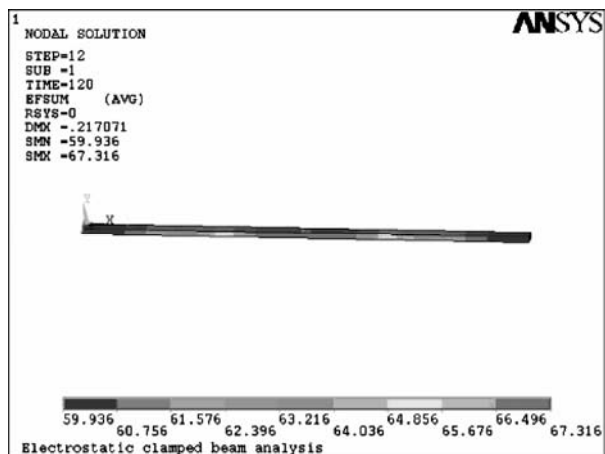


图 7-58 静电场 EF

使用同样方法，选择结构场，选择最后结果，绘制变形情况（图 7-59）。

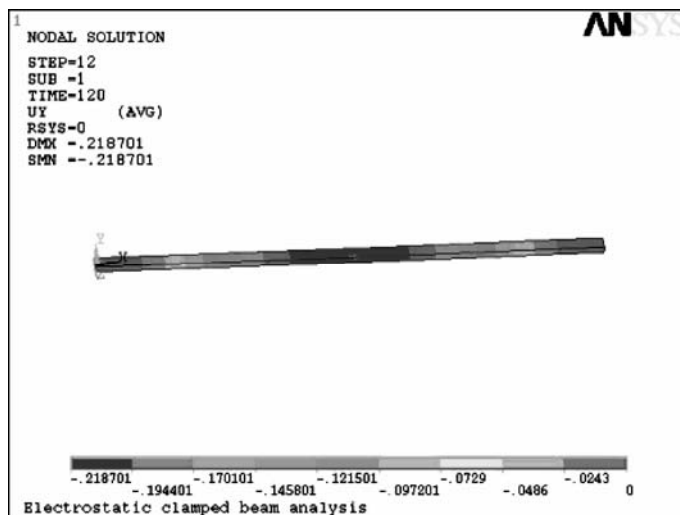


图 7-59 变形情况

2. 命令流操作

```

BL=150                                ! 定义参数
BH=2
BW=4
GAP=2
/PREP7
! 结构场模型
ET,1,45
MP,EX,1,169E3
MP,NUXY,1,0.066
MP,DENS,1,2.329E-15
BLOCK,0,BL,0,BH,0,BW
ASLV                                  ! 网格设置
LSLA
LSEL,R,LOC,X,BL/2
LESIZE,ALL,,,20,,,1
LSLA
LSEL,R,LOC,Y,BH/2
LESIZE,ALL,,,2,,,1
LSLA
LSEL,R,LOC,Z,BW/2
LESIZE,ALL,,,1,,,1
VATT,1,,1

```

```
VMESH,ALL
ALLS
ASEL,S,LOC,Y,BH/2          ! 施加边界条件
ASEL,R,LOC,Z,BW/2
NSLA,S,1
DA,ALL,UX
DA,ALL,UY
DA,ALL,UZ
ALLS
ASEL,S,LOC,Y,BH/2
ASEL,R,LOC,Z,0
NSLA,S,1
DA,ALL,UZ
ALLS
NSEL,S,LOC,Y,0
SF,ALL,FSIN,1              ! 定义界面

! 静电场模型
ET,2,123
EMUNIT,EPZRO,8.854E-6
MP,PERX,2,1
MORPH,ON                    ! 启动网格变形
BLOCK,0,BL,-GAP,0,0,BW
VSEL,S,VOLU,,2              ! 网格设置
SMRTSIZ,2
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
VATT,2,,2
VMESH,ALL
ASLV,S                      ! 施加边界条件
ASEL,R,LOC,X,0
DA,ALL,UX,0
ASLV,S
ASEL,R,LOC,X,BL
DA,ALL,UX,0
ASLV,S
ASEL,R,LOC,Z,0
DA,ALL,UZ,0
ASLV,S
ASEL,R,LOC,Z,BW
```



```

DA,ALL,UZ,0
ASLV,S
ASEL,R,LOC,Y,-GAP
DA,ALL,UY,0
ASLV,S
ASEL,R,LOC,Y,0
NSLA,S,1
SF,ALL,FSIN,1          ! 定义界面
D,ALL,VOLT,120         ! 施加负载
NSEL,S,LOC,Y,-GAP
D,ALL,VOLT,0
ALLSEL,ALL
FINI

/SOLU
MFAN,ON                ! 开启多场仿真
MFEL,1,1               ! 结构场
MFEL,2,2               ! 静电场
MFOR,2,1               ! 场求解顺序
MFCO,ALL,1.0E-5        ! 定义收敛
ANTYP,STAT
EQSLV,ICCG
MORPH,ON
MFCM,2,                ! 静电场分析选项
ANTYP,STAT
NLGEOM,ON
DELTIM,10              ! 每步场循环时间增量
MORPH,OFF
KBC,0                  ! 斜坡载荷
MFCM,1                 ! 结构场分析选项
MFTI,120               ! 结束时间
MFOU,1                 ! 每步输出求解
MFDT,10                ! 交错时间增量
MFIT,20                ! 最大交错数
MFINT,CONS             ! 全局保守载荷转移设置
MFSU,1,2,FORC,1        ! 静电力转移到结构场
MFSU,1,1,DISP,2        ! 变形转移到静电场
SOLVE
SAVE
FINISH
/POST1

```

```

FILE,FIELD2,RTH          ! 选择静电场结果文件
SET,LAST
ESEL,S,TYPE,,2
PLNS,EF,SUM
FINI
/POST1
FILE,FIELD1,RST          ! 选择结构场结果文件
SET,LAST
ESEL,S,TYPE,,1
NSLE,S
PLNS,U,Y
PRDISP
FINISH

```

7.5 载荷转移耦合物理场分析

此方法使用一个物理场分析的结果作为下一个分析的载荷。

7.5.1 物理场环境

载荷转移耦合物理场分析使用物理场环境。物理场环境既指用户建立的包含所有操作参数和性质的文件，也指此文件的内容，使用以下方法建立。

命令操作：

```
PHYSICS,WRITE,Title,Filename,Ext,--
```

菜单操作：

```
Main Menu→Preprocessor→Physics→Environment Main Menu→Solution→Physics→Environment
```

类似的，使用 **PHYSICS,READ** 命令或对应菜单操作 **Main Menu→Preprocessor→Physics→Environment→Read**，读取物理场环境。

7.5.2 求解方法

可以使用分离数据库法或者单独数据库法，使用下列方法读取结果。

命令操作：

```
LDREAD
```

菜单操作：

```
Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Temperature→From Therm Analy
```

```
Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Boundary→Temperature→From Therm Analy
```

```
Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Excitation→AppCurrDens→From Elec An
```

```
Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Other→Electric Field→From Elec An
```

采用分离数据库法，每个数据库拥有适当的实体模型、单元和载荷等，用户读取第一个结果文件的信息到第二个结果文件。

采用单独数据库法，单独的数据库包含所有的物理场分析的单元和节点。对于每一个单元或实体对象，用户必须定义一个性质编号组，包括单元编号、材料编号、实常数编号等。

7.5.3 使用多物理场环境求解

- ① 建立模型；
- ② 建立物理场环境；
- ③ 分别求解不同物理场。

7.6 综合实例

实例 7-3 带孔半圆壳热电耦合分析

如图 7-60 所示的导电半圆壳，顶端施加电压 V_1 和温度 T_1 ，底端施加电压 V_2 ，由于焦耳放热，导致温度升高，总放热量为 $Q = I(V_2 - V_1)$ ，此问题分析有限元模型如图 7-61 所示。

参数为

$\rho = 7 \text{ ohm-m}$
 $K = 3 \text{ W/m-K}$
 $t = 0.2 \text{ m}$
 $r = 10 \text{ m}$
 $\Theta_1 = 10^\circ$
 $\Phi = 3^\circ$
 $V_1 = 0 \text{ volts}$
 $V_2 = 100 \text{ volts}$
 $T_1 = 0^\circ\text{C}$

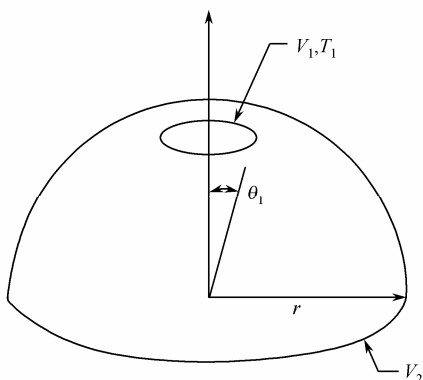


图 7-60 导电半圆壳

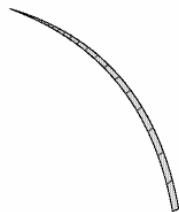


图 7-61 有限元模型



结果文件

——附带光盘“End\Ch7\实例 7-3”文件夹



动画演示

——附带光盘“AVI\Ch7\实例 7-3.avi”

1. GUI 操作

(1) 建立模型

首先定义单元 SHELL157，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，定义 SHELL157。

SHELL157 是一种拥有热和电传导能力的单元。单元有四个节点，两种自由度：温度和电压。单元可以仿真焦耳放热，所以本实例采用此种单元，焦耳放热的求解需要迭代求解。

定义壳厚度为 0.2。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete，定义厚度（图 7-62）。

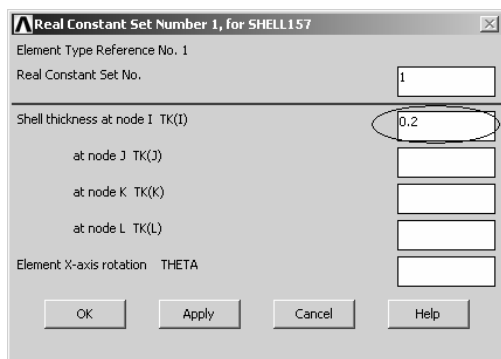


图 7-62 壳厚度为 0.2

定义电阻和热传导率。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，电阻和热传导率分别为 7 和 3。

改变坐标系。选择路径 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Spherical，将坐标系改变为球坐标。

建立模型。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS，在当前坐标系建立坐标为 (10,0,0) 和 (10,0,80) 的节点。

填充节点，并且设置节点间距比例。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Fill between Nds，定义间距比例为 0.1（图 7-63）。

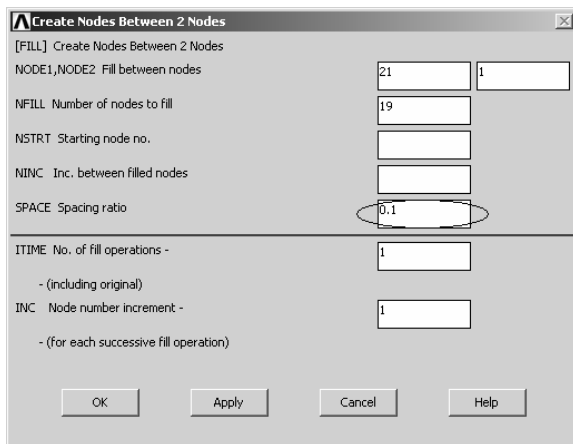


图 7-63 填充节点

复制节点。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Nodes→Copy，复制节点 1~21，并且新建节点和之前节点之间成 3° 的角度（图 7-64）。

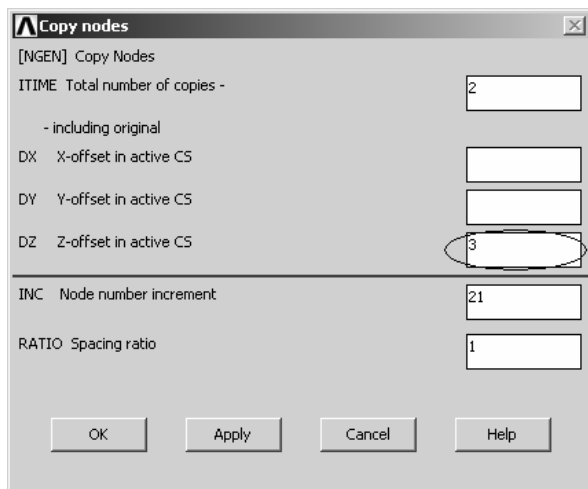


图 7-64 复制节点

建立单元。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes，连接节点 1, 2, 32, 31，建立节点。

将上面建立的单元复制 20 次。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Elements→Auto Numbered，“ITIME”填入“20”（图 7-65）。

（2）耦合自由度

耦合两端节点的电压和温度自由度。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Coupling / Ceqn→Couple DOFs，耦合节点 1 和 31，21 和 51 的电压和温度（图 7-66）。

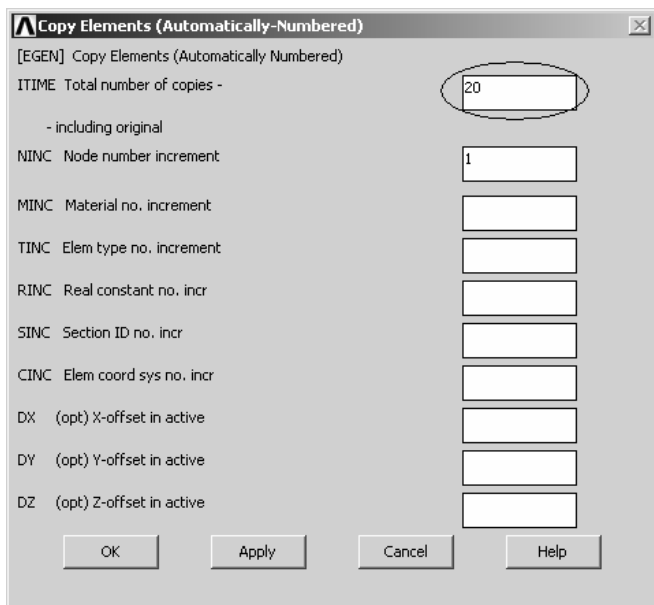


图 7-65 单元复制 20 次

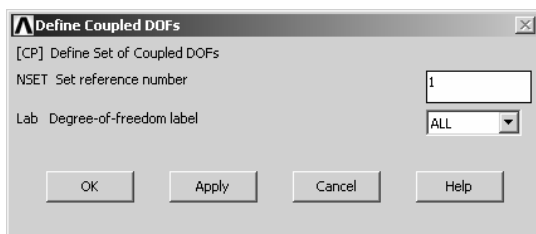


图 7-66 耦合两端节点的电压和温度

(3) 求解

首先，使节点 21 电压和温度都为 0。选择路径 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes，选择“All DOF”，设定值为 0（图 7-67），然后设定节点 1 电压为 100。

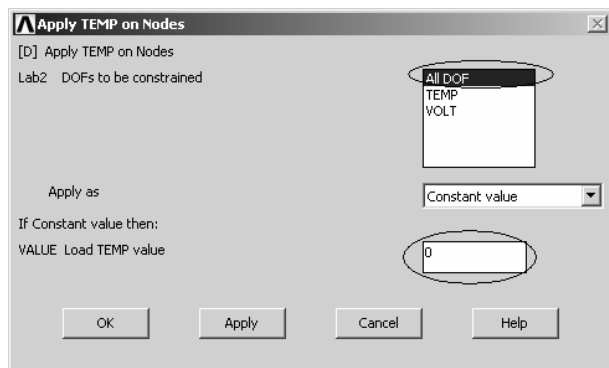


图 7-67 设定边界条件

最后，选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 求解。

(4) 查看结果

选择路径 Main Menu→General Postproc→List Results→Reaction Solu，分别显示 AMPS（图 7-68）和 HEAT（图 7-69）信息。

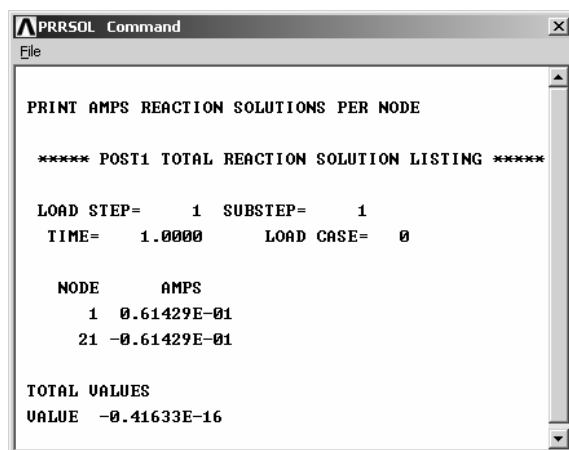


图 7-68 AMPS 信息

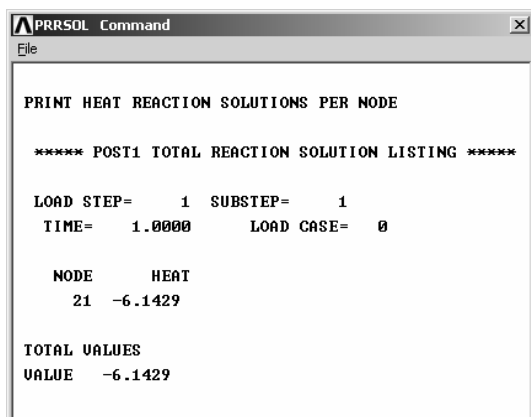


图 7-69 HEAT 信息

2. 命令流操作

```

/PREP7
ET,1,SHELL157          ! 建立模型
R,1,0,2
MP,RSVX,,7
MP,KXX,,3
CSYS,2
N,1,10
N,21,10,,80
FILL,,, ,,, ,0.1
NGEN,2,30,1,21,1,,3
E,1,2,32,31
EGEN,20,1,-1
CP,1,VOLT,1,31
CP,2,TEMP,1,31
CP,3,VOLT,21,51
CP,4,TEMP,21,51
FINISH
/SOLU
OUTPR,,1
D,21,ALL                ! 定义边界条件
D,1,VOLT,100
SOLVE
FINISH
/POST1
PPRSOL,AMPS             !查看结果
PPRSOL,HEAT
  
```

实例 7-4 微机电系统分析

分析一个微机电系统。离散的弹簧、质量块和阻尼器代表机械谐振器，离散的机电换能器代表平行板电容（图 7-70）。

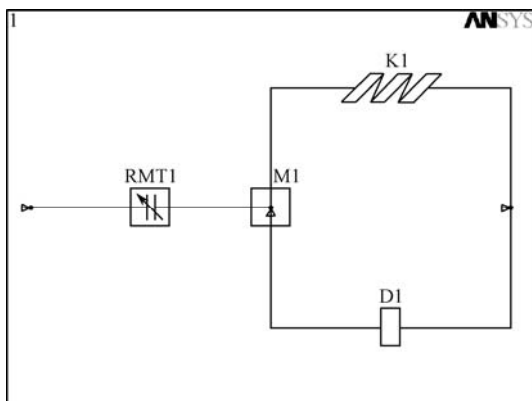


图 7-70 微机电系统

其参数如下：

平行板面积 = $1 \times 10^8 \mu\text{m}^2$

初始间距 = $150 \mu\text{m}$

相对介电常数 = 1.0

质量 = $1 \times 10^{-4} \text{ kg}$

弹性系数 = $200 \mu\text{N}/\mu\text{m}$

阻尼系数 = $40 \times 10^{-3} \mu\text{Ns}/\mu\text{m}$

其激励电压如表 7-2 激励电压和图 7-71 所示。

表 7-2 激励电压

时间 (s)	值 (V)
0.00	5.0
0.03	0.0
0.06	10.0
0.09	0.0
0.12	0.0



结果文件

——附带光盘“End\Ch7\实例 7-4”文件夹



动画演示

——附带光盘“AVI\Ch7\实例 7-4.avi”

1. GUI 操作

(1) 建立模型

第一步 建立换能器单元。

定义单元。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，定义单元 TRANS126。

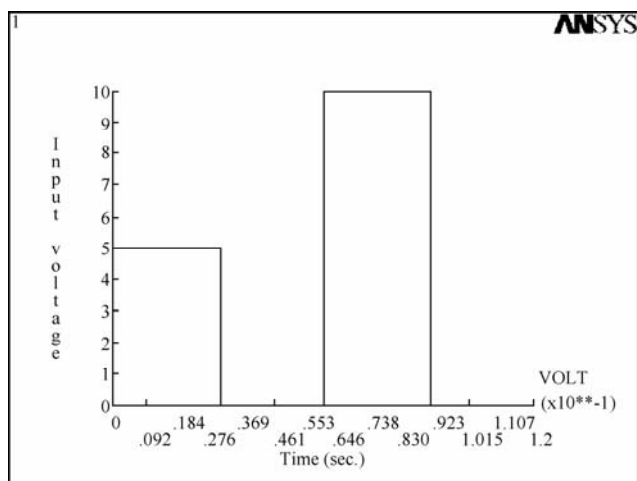


图 7-71 激励电压

定义初始间距和 C0。先选择路径 Main Menu → Preprocessor → Real Constants → Add/Edit/Delete，定义初始间距 = $150\ \mu\text{m}$ （图 7-72）。为简化操作，命令输入行中输入：RMORE,8.854E-6*1E8。

建立节点和单元。首先选择路径 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Nodes → In Active CS，在点 X=0 和 0.1 建立节点，再选择路径 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Elements → Auto Numbered → Thru Nodes，连接以上节点。

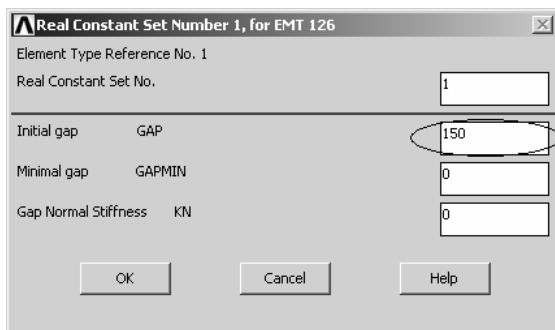


图 7-72 定义初始间距

第二步 建立质量块单元。

用类似方法，定义单元 MASS21，其自由度为 UX, UY，设置如图 7-73 所示。

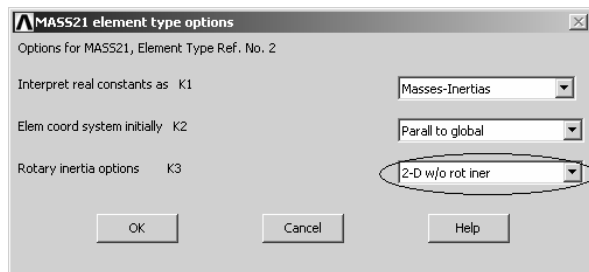


图 7-73 定义单元属性及坐标系

定义质量，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete，其质量为 $1\text{e-}4$ （图 7-74）。然后命令输入框输入：rmod,2,7,,1，修改实常数。最后采用单元 2，实常数 2 在节点 2 建立单元。

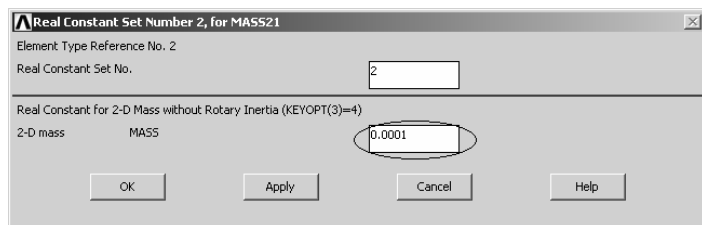


图 7-74 其质量为 $1\text{e-}4$

第三步 建立弹簧单元，使用单元 COMBIN14。定义单元的 UX 方向自由度（图 7-75）。

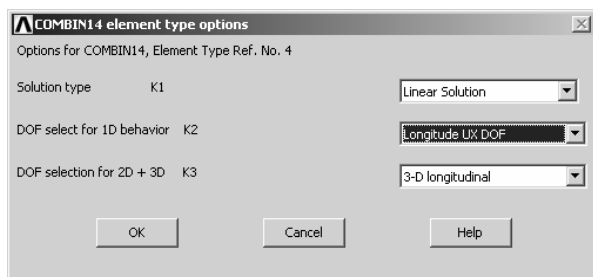


图 7-75 定义 UX 方向自由度

然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Real，定义弹性系数为 200（图 7-76）。

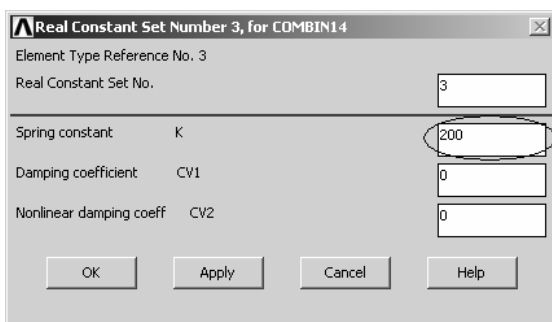


图 7-76 定义弹性系数为 200

在 $X=0.2$ 位置建立节点 3，连接节点 2,3 建立单元。

第四步 建立阻尼器。

同样使用单元的 COMBIN14，定义单元的 UX 方向自由度，然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Real，定义阻尼系数为 $40\text{e-}3$ 。

连接节点 2，3 建立单元。

（2）施加自由度负载

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes，选择节点 1 和 3，UX 方向自由度为 0（图 7-77），然后用类似方法，定义节点 1 电压为 0V，UY 方向自由度为 0。

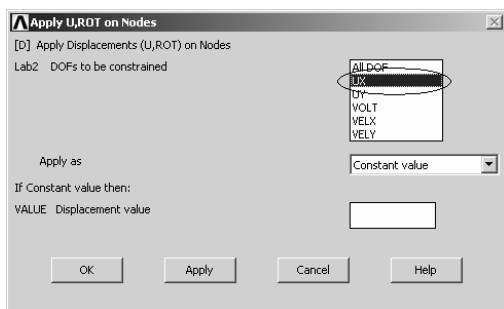


图 7-77 UX 方向自由度为 0

(3) 求解

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Sol'n Controls→Transient，选择瞬态仿真，阶跃载荷，在节点 2 施加电压 5V（图 7-78）。

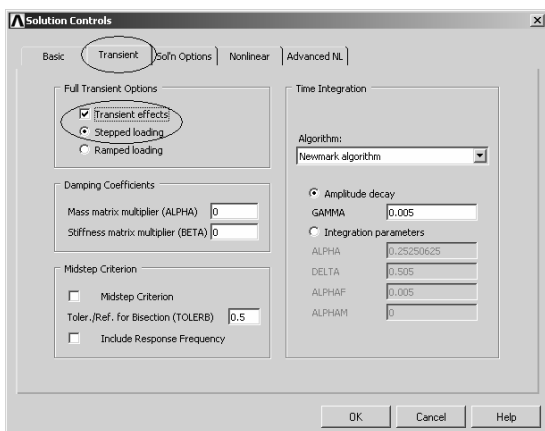


图 7-78 选择瞬态仿真

建立电压信号，其波形如图 7-71 所示。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Sol'n Controls→Basic，其结束时间为 0.3，时间增量、最小最大时间增量分别为 0.0005,0.0001,0.01（图 7-79）。

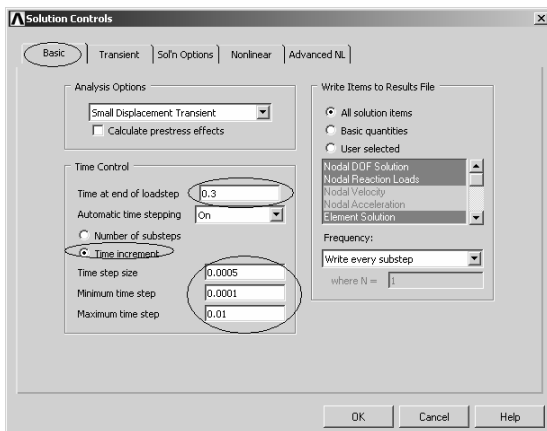


图 7-79 建立电压信号

设置收敛选项。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Sol'n Controls→Nonlinear，收敛载力。单击“Set convergence criteria”（图 7-80），然后单击“Add”，选择“F”（图 7-81），求解。

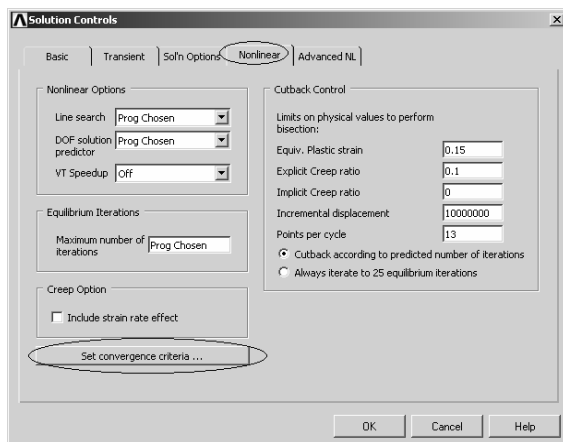


图 7-80 单击“Set convergence criteria”界面

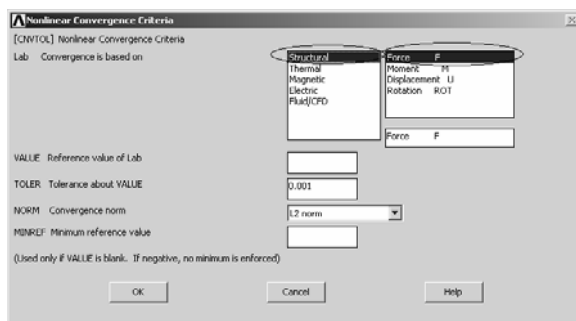


图 7-81 选择“F”界面

选择结束时间 0.6，节点 2 电压 0V，求解。选择结束时间 0.9，电压 10V，求解。再选择结束时间 0.12，电压 0V，求解。

(4) 查看结果

选择路径 Main Menu→TimeHist Postpro→Define Variables，获取节点 2 的 X 方向位移数据（图 7-82）。

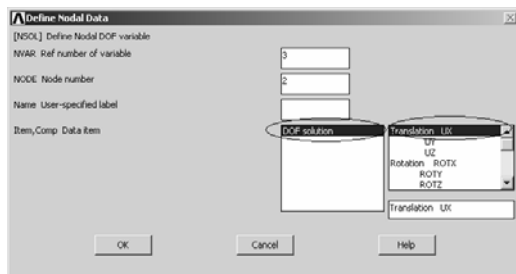


图 7-82 节点 2 的 X 方向位移数据

确定 X 轴 Y 轴范围和标签。选择路径 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Axes, X, Y 方向范围分别为 0~0.12, -0.2~0.1。标签分别为 Time (sec.), Displacement (micro meters) (图 7-83)。

绘制变量 2, 选择路径 Main Menu→TimeHist Postpro→Graph Variables (图 7-84)。结果如图 7-85 所示。

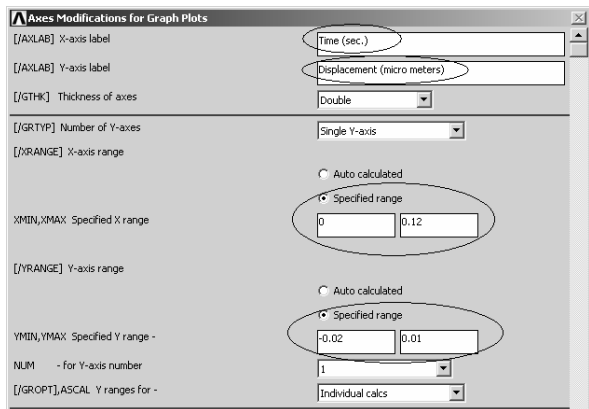


图 7-83 确定 X 轴 Y 轴范围和标签

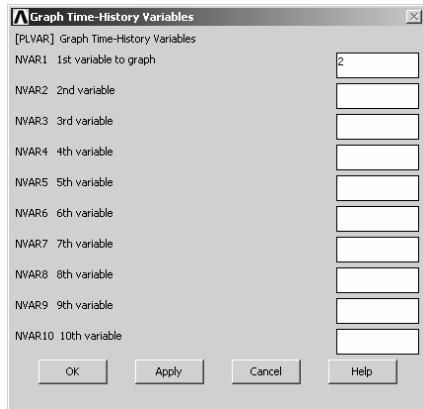


图 7-84 绘制变量 2

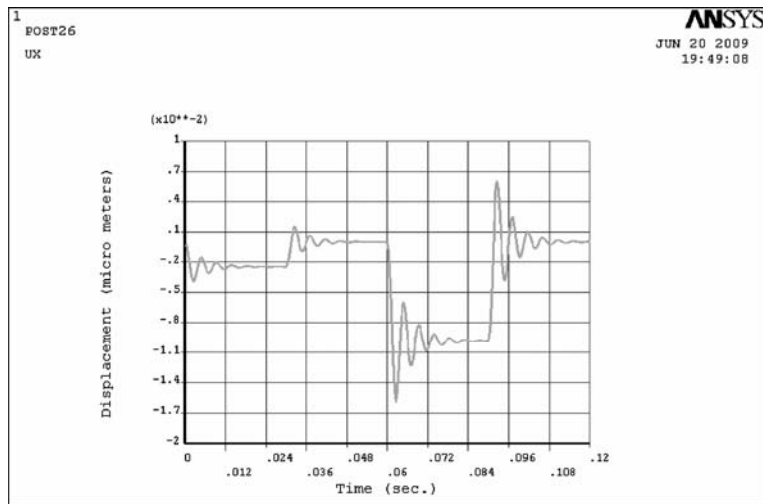


图 7-85 变量 2 结果

2. 命令流操作

```

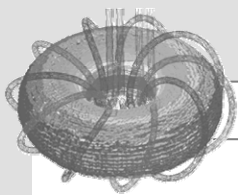
/PREP7
ET,1,TRANS126          ! 换能器
R,1,,1,150
RMORE,8.854E-6*1E8
N,1
N,2,0.1

```

```
E,1,2
ET,2,21,,,4          ! 质量块
R,2,1E-4
RMOD,2,7,,1
TYPE,2
REAL,2
E,2
ET,3,14,,1           ! 弹簧
R,3,200,,,0.05,1
N,3,0.2
TYPE,3
REAL,3
E,2,3
ET,4,14,,1           ! 阻尼器
R,4,,40E-3,,0.05,1
TYPE,4
REAL,4
E,2,3
NSEL,S,NODE,,1,3,2    ! 定义边界条件
D,ALL,UX,0
NSEL,ALL
D,1,VOLT,0
D,2,UY,0
FINISH

/SOLU
ANTYP,TRANS
KBC,1                 ! 定义输入电压信号
D,2,VOLT,5
TIME,.03
DELTIM,.0005,.0001,.01
AUTOS,ON
OUTRES,ALL,ALL
CNVTOL,F
SOLVE
TIME,.06
D,2,VOLT,0
SOLVE
TIME,.09
D,2,VOLT,10
```

```
SOLVE
TIME,.12
D,2,VOLT,0
SOLVE
FINISH
/POST26
NSOL,2,2,U,X          ! 查看结果
/XRANGE,0,.12
/YRANGE,-.02,.01
/AXLAB,X,TIME (SEC.)
/AXLAB,Y,DISPLACEMENT (MICRO METERS)
PLVAR,2
FINISH
```



第8章 综合工程实例

本章应用前面所学知识，给出五个综合工程实例。

8.1 工程实例1——电致弹性分析

一个电介质弹性体位于两个电极间，施加电场导致它在厚度和长度方向上压缩，分析其在一定电压下的形变，以及在正弦波电压下长度方向随时间的形变。

其参数如下：

杨氏模量 (Y) = $3.6\text{E}6$ Pa

泊松比 (MU) = 0.4999

相对介电常数 (EPS) = 8.8

真空中介电常数 (EPS0) = $8.854\text{E}-12$ F/m

长度 (L) = 1.1 mm

宽度 (W) = 0.11 mm

厚度 (T) = 0.055 mm

电场强度 (EF0) = $7\text{E}6$ V/m

电压 (V) = EF0*T V

频率 (FREQ) = 1000 Hz



结果文件

——附带光盘 “End\Ch8\实例 8-1” 文件夹



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch8\实例 8-1.avi”

8.1.1 GUI 操作

1. 建立模型

(1) 设置参数

选择路径 Utility Menu → Parameters → Scalar Parameters，设置以下参数（图 8-1）：

L=1.1E-3

W=0.11E-3

T=0.055E-3


```

EF0=7E6
V=EF0*T
Y=3.6E6
MU=0.4999
EPS=8.8
EPS0=8.854E-12

```

参数设置时, 单击 “Accept” 按钮确认每个输入的参数, 最后结束时单击 “Close” 按钮关闭此对话框。

(2) 建立模型

首先定义单元。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 定义单元 SOLID226。

然后定义单元选项。单击 “Element Types” 对话框的 “Options...” 按钮 (图 8-2), 定义分析类型为 “Electroelastic” (图 8-3)。

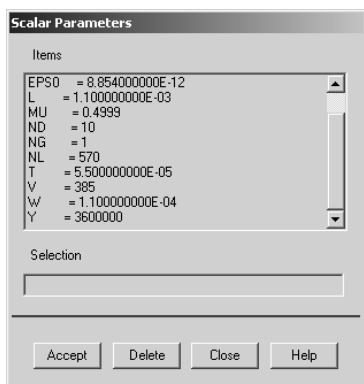


图 8-1 设置参数

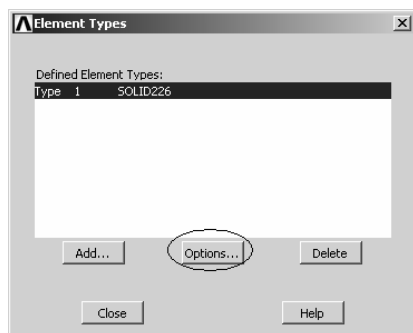


图 8-2 单击 “Options...” 按钮

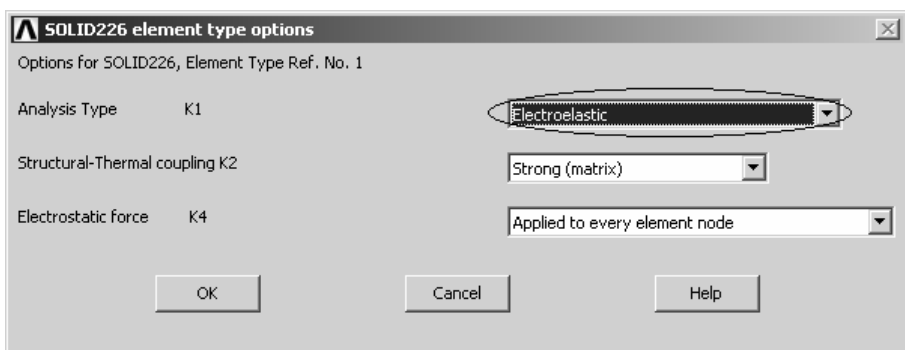


图 8-3 分析类型为 “Electroelastic”

然后定义材料属性。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models, 定义杨氏模量为 Y, 泊松比为 MU (图 8-4), 相对介电常数为 EPS (图 8-5)。

再建立模型。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions, 建立 X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2 分别为 -L/2,L/2,-W/2,W/2,0,T 的体 (图 8-6)。

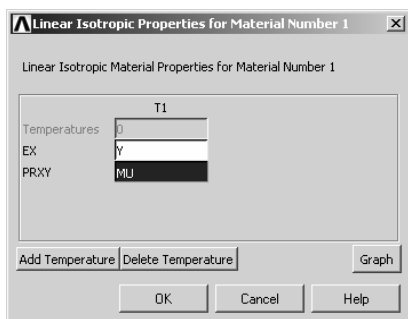


图 8-4 定义杨氏模量和泊松比

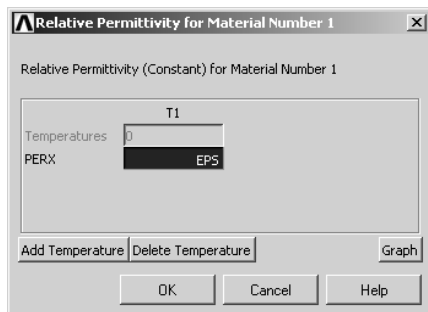


图 8-5 定义相对介电常数

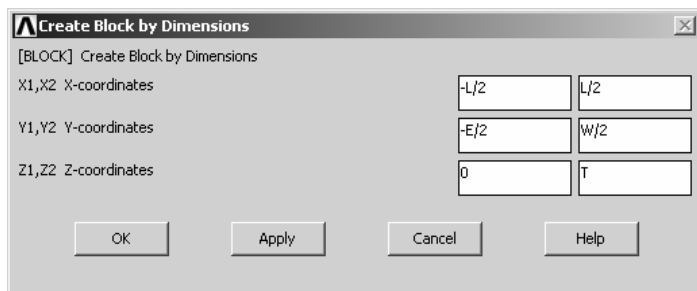


图 8-6 建立模型

(3) 划分网格

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Size, 设定“Size”为“T/2”。最后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Free, 划分此实体(图 8-7)。

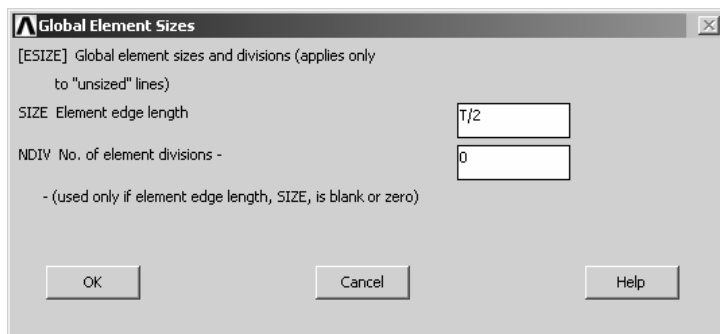


图 8-7 设定“Size”为 T/2

2. 设定边界条件

(1) 设定结构场边界条件

选择路径 Utility Menu→Select→Entities, 选择 $X=-L/2$ 处的节点(图 8-8)。

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes, 选择“Pick All”(图 8-9), 设置此处节点 X 方向位移为 0(图 8-10)。

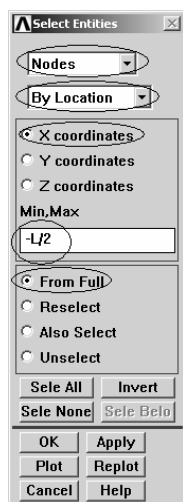
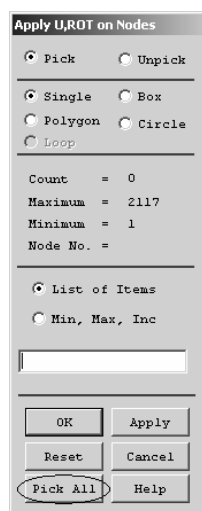
图 8-8 选择 $X=-L/2$ 处的节点

图 8-9 选择“Pick All”

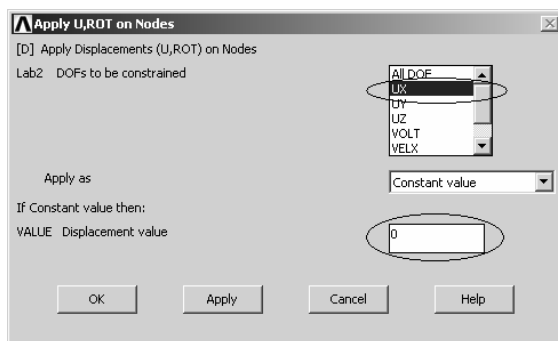


图 8-10 设置此处节点 X 方向位移为 0

选择 $Y=-W/2$ 处节点（图 8-11），注意要点选“Reselect”。

设置此处节点 Y 方向位移为 0（图 8-12）。

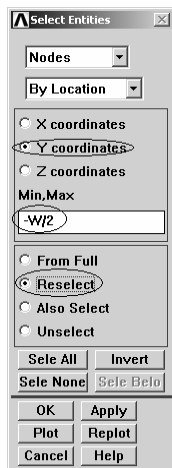
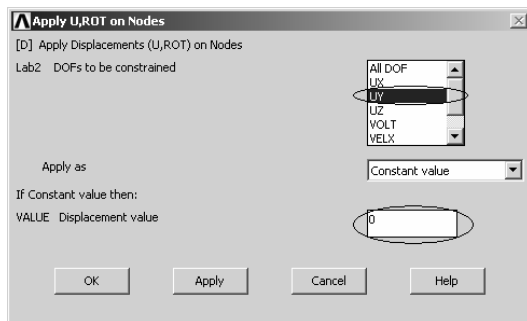
图 8-11 选择 $Y=-W/2$ 处节点

图 8-12 设置此处节点 Y 方向位移为 0

继续选择节点 $Z=0$ 处节点 Z 方向位移为 0，注意仍然选择 “Reselect”。

(2) 设定电场边界条件

选择路径 Utility Menu→Select→Entities，选择 $Z=0$ 处的节点（图 8-13）。

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Coupling / Ceqn→Couple DOFs，耦合所有选中节点的电压自由度（图 8-14）。



图 8-13 选择 $Z=0$ 处的节点

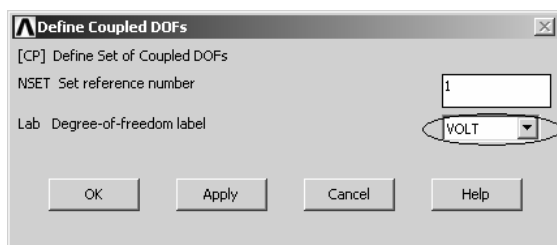


图 8-14 耦合所有选中节点的电压自由度

然后，在命令输入框输入 $NG=NDNEXT(0)$ ，再选择所有节点。

用类似方法选择 $Z=T$ 处的节点，耦合它们的电压自由度，然后命令输入框输入 $NL=NDNEXT(0)$ ，再选择所有节点。

设置两端电压值。选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage→On Nodes，设置 NG 和 NL 节点电压分别为 0 和 V （图 8-15）。

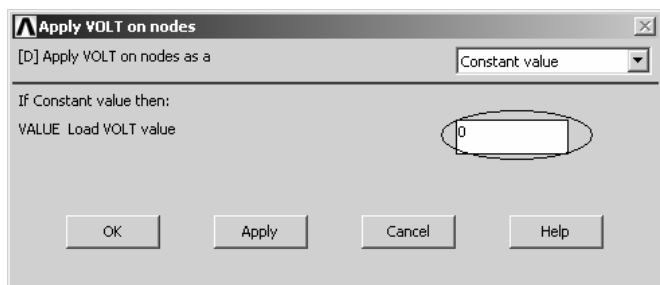


图 8-15 NG 节点电压为 0

这里因为已经耦合了节点，所以设置 NG 和 NL 的电压，那么与它们耦合的节点的电压自由度也自动设置了。

3. 求解

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Sol'n Controls→Nonlinear→Set convergence criteria，设置值为 0.001（图 8-16），然后选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，求解。

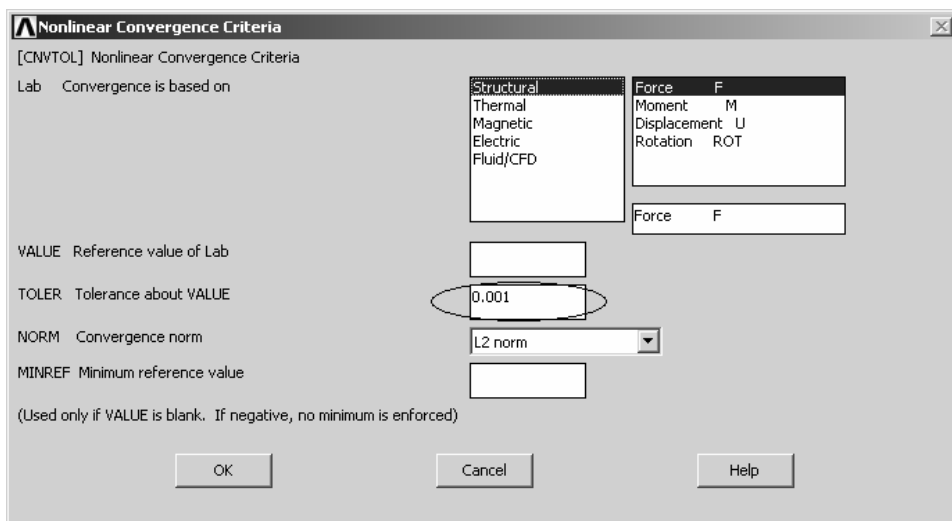


图 8-16 设置容差

4. 查看结果

选择路径 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape, 查看变形 (图 8-17)。

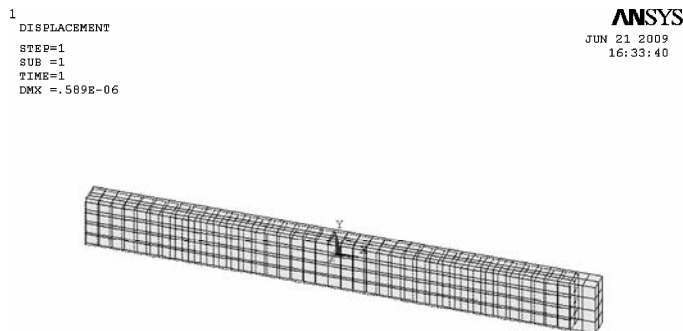


图 8-17 变形情况

8.1.2 命令流操作

! 几何参数

L=1.1E-3

W=0.11E-3

T=0.055E-3

! 长度

! 宽度

! 厚度

! 载荷参数

EF0=7E6

V=EF0*T

! 电场强度

! 电压

! 材料参数

Y=3.6E6

MU=0.4999

EPS=8.8

EPS0=8.854E-12

! 杨氏模量

! 泊松比

! 相对介电常数

! 真空中介电常数

/PREP7

! 建立模型

ET,1,SOLID226,1001

MP,EX,1,Y

MP,PRXY,1,MU

MP,PERX,1,EPS

BLOCK,-L/2,L/2,-W/2,W/2,0,T

ESIZE,T/2

VMESH,1

! 定义单元

! 定义材料属性

! 建立模型

! 划分网格设置

! 划分网格

! 设定结构场边界条件

NSEL,S,LOC,X,-L/2

D,ALL,UX,0

NSEL,R,LOC,Y,-W/2

D,ALL,UY,0

NSEL,R,LOC,Z,0

D,ALL,UZ,0

! 设定电场边界条件

NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Z,0

NSEL,R,LOC,X,-L/2,L/2

NSEL,R,LOC,Y,-W/2,W/2

CP,1,VOLT,ALL

NG=NDNEXT(0)

! 地电压

NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Z,T

NSEL,R,LOC,X,-L/2,L/2

NSEL,R,LOC,Y,-W/2,W/2

CP,2,VOLT,ALL

NL=NDNEXT(0)

! 载荷电压

NSEL,ALL

```

! 求解
/SOLU
CNVTOL,F,1,1.E-6           ! 设置收敛值
D,NG,VOLT,0                 ! 加载
D,NL,VOLT,V
SOLVE
FINI

! 查看结果
/POST1
PLDISP,1                    ! 绘制变形
ANDSCL                      ! 动画效果

```

8.2 工程实例 2——二维螺线管制动器

图 8-18 为一个二维螺线管制动器，其几何参数如下：

N=650	匝数
I=1.0	电流
TA=.75	磁路内支路厚度
TB=.75	磁路下支路厚度
TC=.50	磁路外支路厚度
TD=.75	衔铁厚度
WC=1	线圈宽度
HC=2	线圈高度
GAP=.25	间隙
SPACE=.25	线圈周围空间
WS=WC+2*SPACE	
HS=HC+.75	
W=TA+WS+TC	模型总宽度
HB=TB+HS	
H=HB+GAP+TD	模型总高度
ACOIL=WC*HC	线圈截面积
JDENS=N*I/ACOIL	线圈电流密度



结果文件

——附带光盘“End\Ch8\实例 8-2”文件夹



动画演示

——附带光盘“AVI\Ch8\实例 8-2.avi”

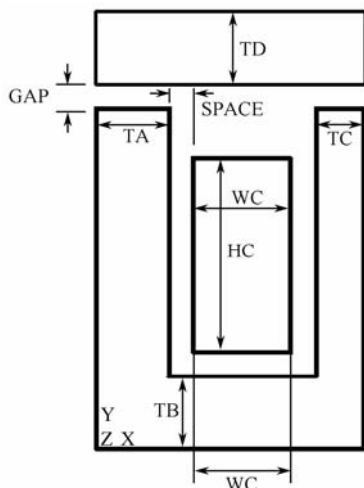


图 8-18 二维螺线管制动器

8.2.1 GUI 操作

1. 定义参数

选择路径 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，设置以下参数（图 8-19）：

N=650	匝数
I=1.0	电流
TA=.75	磁路内支路厚度
TB=.75	磁路下支路厚度
TC=.50	磁路外支路厚度
TD=.75	衔铁厚度
WC=1	线圈宽度
HC=2	线圈高度
GAP=.25	间隙
SPACE=.25	线圈周围空间
$WS=WC+2*SPACE$	
$HS=HC+.75$	
$W=TA+WS+TC$	模型总宽度
$HB=TB+HS$	
$H=HB+GAP+TD$	模型总高度
$ACOIL=WC*HC$	线圈截面积
$JDENS=N*I/ACOIL$	线圈电流密度

2. 建立模型

(1) 定义单元

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，定义单元 PLANE53。

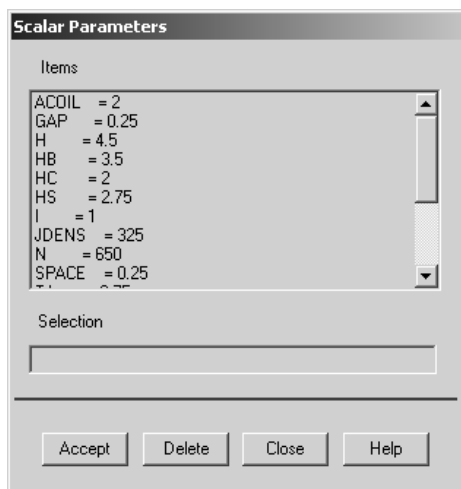


图 8-19 设置参数

然后定义单元选项。单击“Element Types”对话框的“Options...”按钮，定义单元行为“Axisymmetric”（图 8-20）。

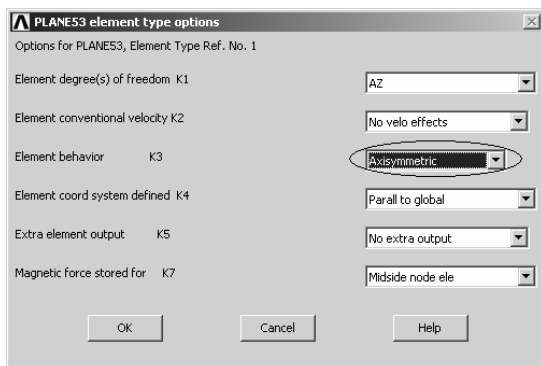


图 8-20 定义单元行为为“Axisymmetric”

（2）定义材料属性

选择路径 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Other→Change Mat Props→Material Models，定义相对磁导率。分别定义空气、贴型、线圈和衔铁的材料编号为 1，2，3，4，相对磁导率为 1、1000，1、2000（图 8-21）。其中材料编号定义方法如图 8-22 所示。

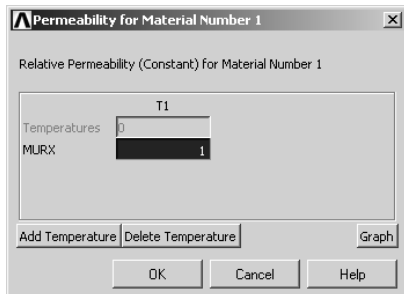


图 8-21 空气相对磁导率

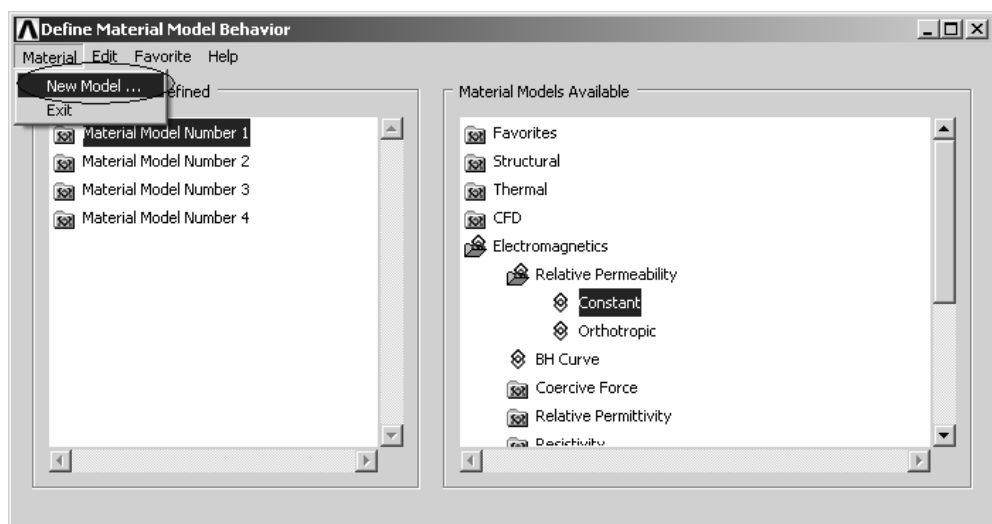


图 8-22 定义材料编号

(3) 建立模型

选择路径 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Rectangle → By Dimensions, 建立 X1、X2、Y1、Y2 分别为 “0,W,0,TB” (图 8-23), “0,W,TB,HB”, “TA,TA+WS,0,H”, “TA+SPACE,TA+SPACE+WC,TB+SPACE,TB+SPACE+HC” 的矩形。

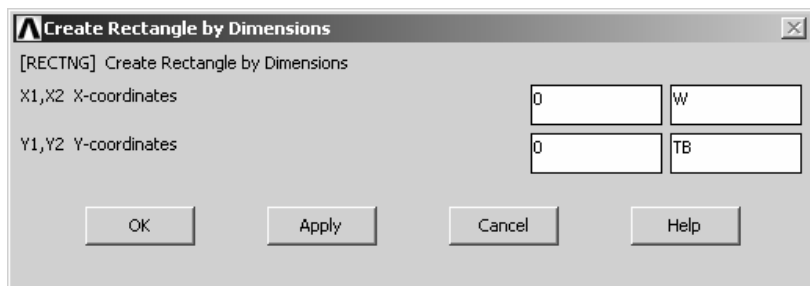


图 8-23 建立矩形

然后选择所有矩形, 执行重合操作。选择路径 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Overlap → Areas。选择 “Pick All” (图 8-24), 选择全部面, 完成操作。

选择路径 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Rectangle → By Dimensions, 建立 X1, X2, Y1, Y2 分别为 “0,W,0,HB+GAP”, “0,W,0,H” 的矩形, 然后再次选择路径 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Overlap → Areas。选择 “Pick All”, 选择全部面, 完成操作。

(4) 显示模型

选择路径 Utility Menu → Plot → Areas, 显示建立好的实体模型 (图 8-25)。

(5) 定义不同面的材料属性

选择路径 Main Menu → Preprocessor → Meshing → Mesh Attributes → Picked Areas, 选择 “List of Items” 先定义面 2 (图 8-26) 的材料属性为 3 (图 8-27)。

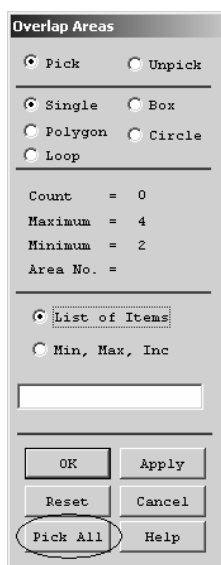


图 8-24 选择所有矩形

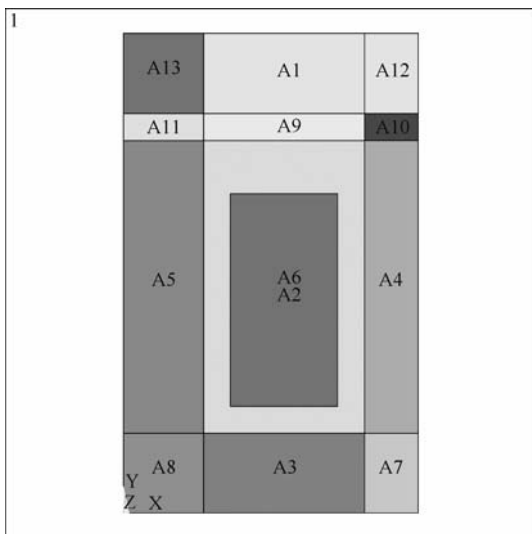


图 8-25 建立好的实体模型

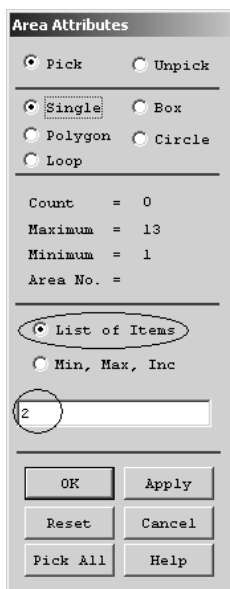


图 8-26 选择“List of Items”先定义面 2

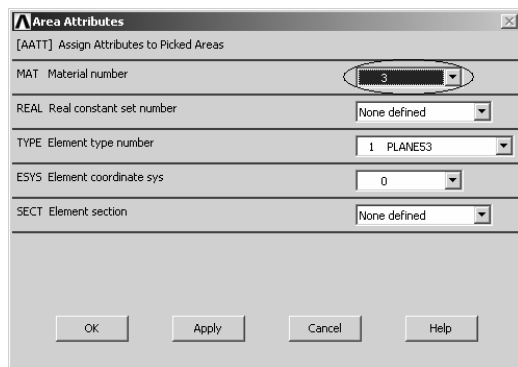


图 8-27 定义材料属性

类似方法，定义面 1,12,13 材料属性为 4，面 3，4，5，7，8 材料属性为 2。

(6) 显示根据材料性质绘制的图形

选择路径 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering (图 8-28)，显示根据材料性质绘制的图形 (图 8-29)。

3. 划分网格

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→SmartSize→Basic，设定级别为 4 (图 8-30)。

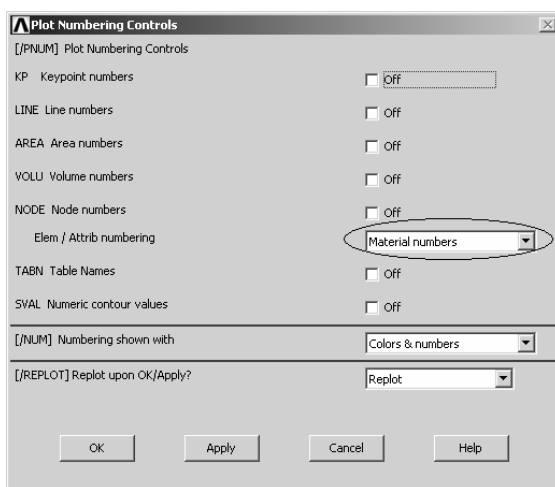


图 8-28 选择材料编号

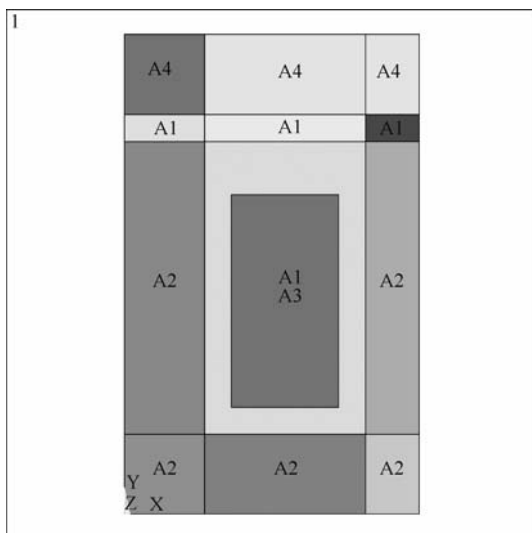


图 8-29 显示根据材料性质绘制的图形

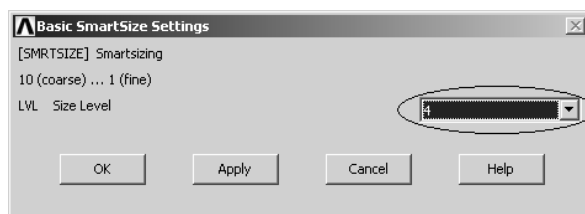


图 8-30 设定级别为 4

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Free，划分网格（图 8-31）。

4. 施加载荷

首先选择路径 Utility Menu→Select→Entities，选择材料 4（图 8-32）。

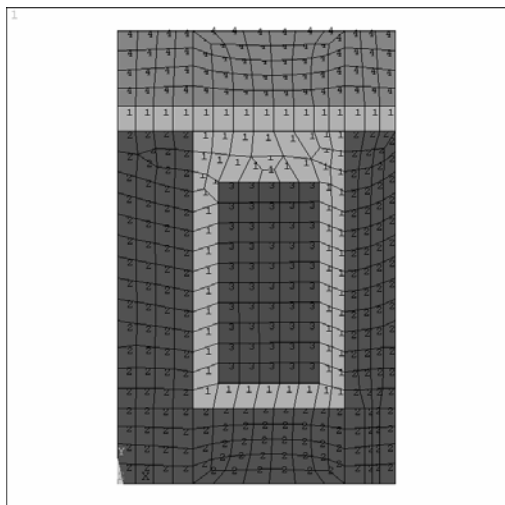


图 8-31 划分网格结果

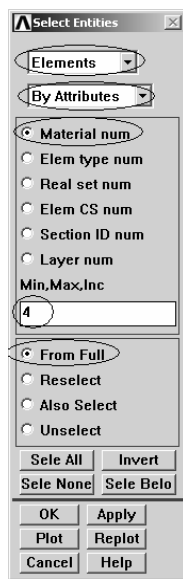


图 8-32 选择材料 4

然后选择路径 **Utility Menu**→**Select**→**Comp/Assembly**→**Create Component**，建立组件 ARM（图 8-33）。

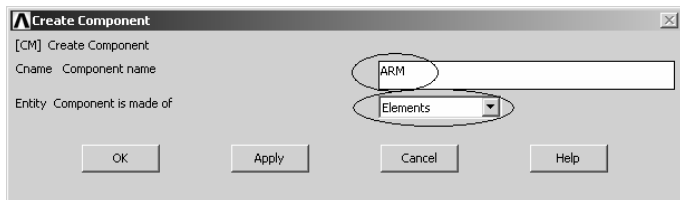


图 8-33 建立组件 ARM

接着选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Loads**→**Define Loads**→**Apply**→**Magnetic**→**Flag**→**Comp. Force/Torque**，定义 ARM（图 8-34）。

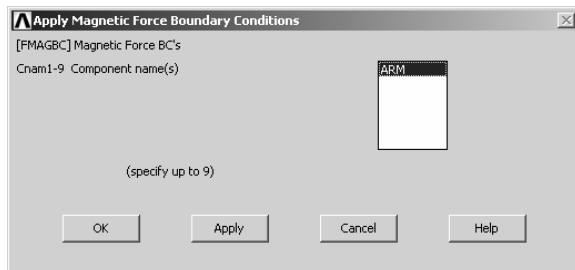


图 8-34 定义 ARM

选择路径 **Utility Menu**→**Select**→**Entities**，选择全部面。首先选择“Sele All”，然后单击“Cancel”按钮关闭窗口（图 8-35）。

最后选择路径 **Main Menu**→**Preprocessor**→**Modeling**→**Operate**→**Scale**→**Areas**，X, Y, Z 分别缩放 0.01, 0.01, 1，删除旧模型（图 8-36）。

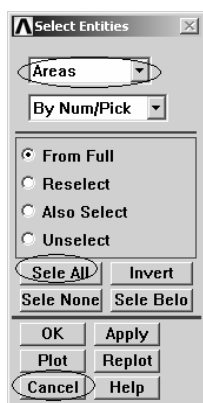


图 8-35 选择全部面

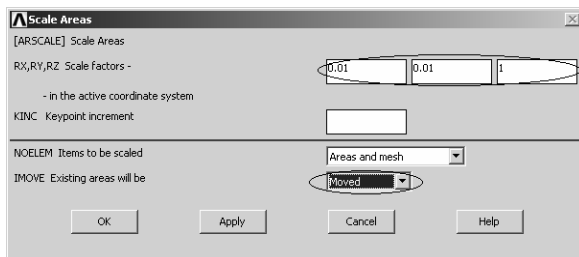


图 8-36 缩放模型

5. 求解

用类似选择材料 4 的方法，选择材料 3。

首先施加负载即电流密度。选择路径 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Magnetic→Excitation→AppCurrDens→On Elements，施加电流密度，VAL3 中填入“ $j_{dens}/0.1**2$ ”（图 8-37）。

然后选择全部单元。

再施加 AZ。选择路径 Utility Menu→Select→Entities，选择所有外部节点（图 8-38）。

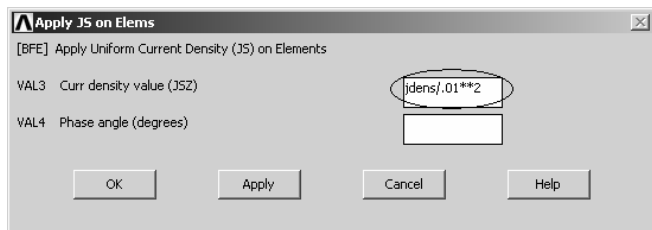


图 8-37 施加电流密度



图 8-38 选择所有外部节点

然后将所有选中节点施加 $AZ=0$ 。选择路径 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Magnetic→Boundary→VectorPot→Flux Par'l→On Nodes，施加此负载。接着选择路径 Utility Menu→Select→Everything，选择全部。

最后选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Electromagnet→Static Analysis→Opt&Solv，求解。

6. 查看结果

选择路径 Utility Menu→Plot→Results→Flux Lines，绘制磁力线（图 8-39）。

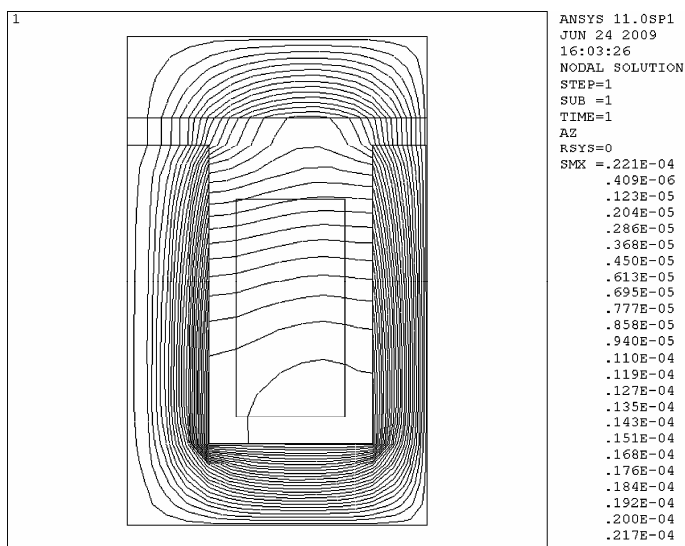


图 8-39 磁力线

选择路径 Main Menu→General Postproc→Elec&Mag Calc→Component Based→Force，选择“ARM”对磁力求和（图 8-40）。结果如图 8-41 所示。



图 8-40 选择“ARM”对磁力求和

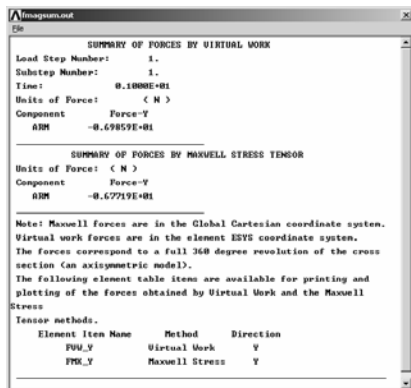


图 8-41 磁力求和结果

选择路径 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Vector Plot→Predefined，绘制磁力线矢量图（图 8-42）。

8.2.2 命令流操作

```
/PREP7
! 定义参数
N=650
I=1.0
TA=.75
TB=.75
TC=.50
```

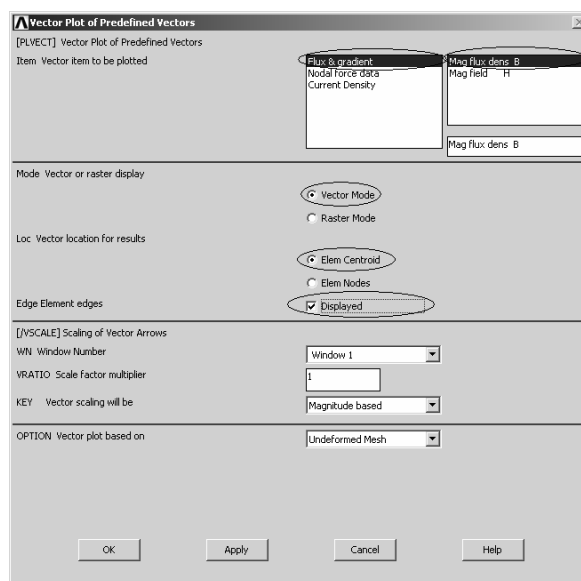


图 8-42 绘制磁力线矢量图

```

TD=.75
WC=1
HC=2
GAP=.25
SPACE=.25
WS=WC+2*SPACE
HS=HC+.75
W=TA+WS+TC
HB=TB+HS
H=HB+GAP+TD
ACOIL=WC*HC
JDENS=N*I/ACOIL

```

! 建立模型

```

ET,1,PLANE53
KEYOPT,1,3,1
MP,MURX,1,1
MP,MURX,2,1000
MP,MURX,3,1
MP,MURX,4,2000

```

! 定义单元

! 对称选项

! 定义相对磁导率

```

/PNUM,AREA,1
RECTNG,0,W,0,TB
RECTNG,0,W,TB,HB

```

! 显示面编号

! 建立模型


```
RECTNG,TA,TA+WS,0,H
RECTNG,TA+SPACE,TA+SPACE+WC,TB+SPACE,TB+SPACE+HC
AOVLAP,ALL
RECTNG,0,W,0,HB+GAP
RECTNG,0,W,0,H
AOVLAP,ALL
NUMCMP,AREA
APLOT
```

! 关联材料属性

```
ASEL,S,AREA,,2
AATT,3,1,1,0
ASEL,S,AREA,,1
ASEL,A,AREA,,12,13
AATT,4,1,1
ASEL,S,AREA,,3,5
ASEL,A,AREA,,7,8
AATT,2,1,1,0
/PNUM,MAT,1
ALLSEL,ALL
APLOT
```

! 划分网格

```
SMRTSIZE,4
AMESH,ALL
ESEL,S,MAT,,4
CM,ARM,ELEM
FMAGBC,'ARM'
ALLSEL,ALL
ARSCAL,ALL,,,.01,.01,1,,1 ! SCALE MODEL TO MKS (METERS)
FINISH
```

! 求解

```
/SOLU
ESEL,S,MAT,,3
BFE,ALL,JS,1,,,JDENS/.01**2
ESEL,ALL
NSEL,EXT
D,ALL,AZ,0
ALLSEL,ALL
```

```

FINISH
/SOLU
MAGSOLV
SAVE
FINISH

! 查看结果
/POST1
PLF2D
FMAGSUM
PLVECT,B,,,VECT,ELEM,ON
/GRAPHICS,POWER
AVRES,2
PLNSOL,B,SUM
FINISH

```

8.3 工程实例 3——屏蔽微带传输线

屏蔽微带传输线由基板、微带和屏蔽组成（图8-43）。微带电压为 V_1 ，屏蔽电压为 V_0 。确定传输线的电容。其有限元模型如图 8-44 所示。

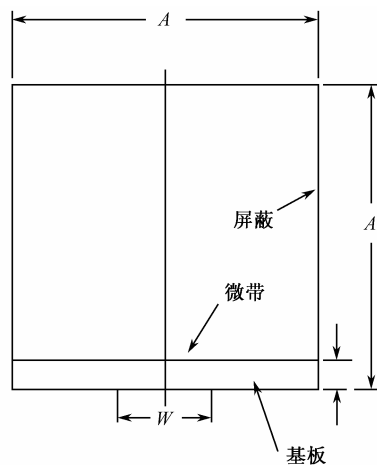


图 8-43 屏蔽微带传输线模型

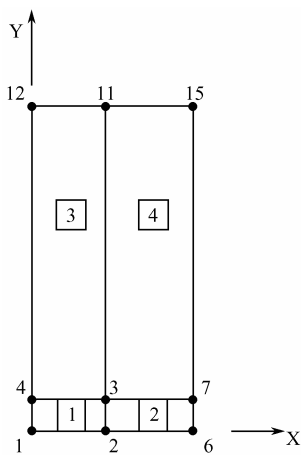


图 8-44 屏蔽微带传输线有限元模型

参数如下所述。

空气相对介电常数: $\epsilon_r = 1$

基板相对介电常数: $\epsilon_r = 10$

$$a = 10 \text{ cm}$$

$$b = 1 \text{ cm}$$

$$w = 1 \text{ cm}$$

$$V_1 = 10 \text{ V}$$

$$V_0 = 1 \text{ V}$$



结果文件

——附带光盘“End\Ch8\实例 8-3”文件夹



动画演示

——附带光盘“AVI\Ch8\实例 8-3.avi”

8.3.1 GUI 操作

1. 选择偏好和定义参数

选择路径 Main Menu→Preferences，选择“Magnetic-Nodal”和“Electric”（图 8-45）。

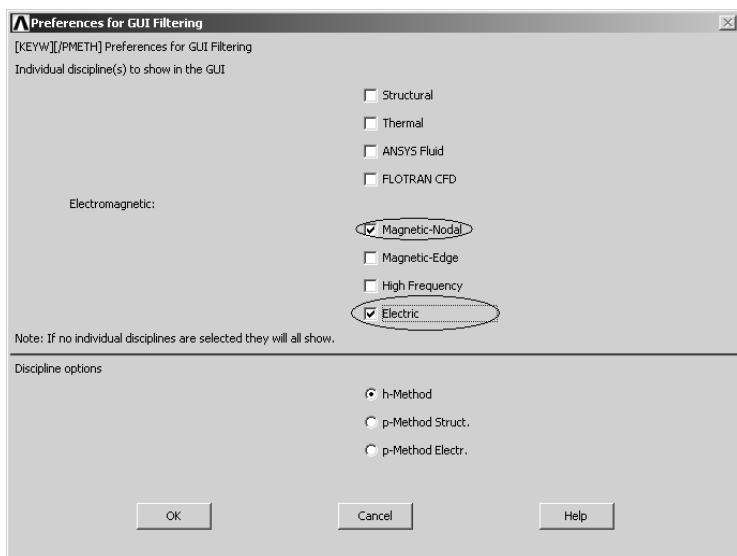


图 8-45 选择“Magnetic-Noda”和“Electric”

然后定义参数，选择路径 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，输入（图 8-46）：

$$V_1 = 1.5$$

$$V_0 = 0.5$$

2. 建立模型

(1) 定义单元

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，定义单元 PLANE121。

(2) 定义材料属性

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，定义相对介电常数。分别定义材料 1 和材料 2 的相对介电常数为“1”和“10”（图 8-47）。

(3) 建立模型

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions，分别建立 X1,X2,Y1,Y2 分别为“0,0.5,0,1”（图 8-48），“0.5,5,0,1”，“0,0.5,1,10”，“0.5,5,1,10”的矩形。

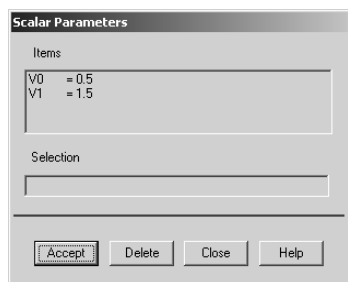


图 8-46 定义参数

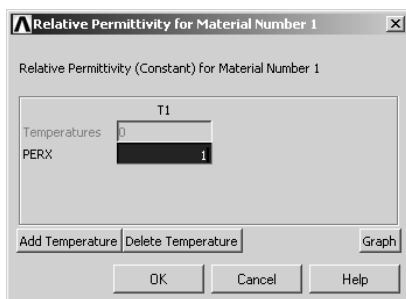


图 8-47 材料 1 相对介电常数

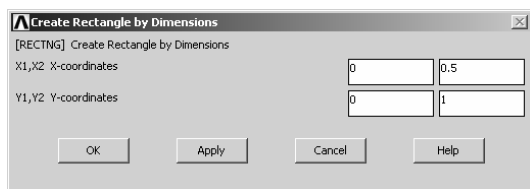


图 8-48 建立矩形

然后选择路径 Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Glue → Areas，选择“Pick All”黏合所有面（图 8-49）。

最后选择路径 Main Menu → Preprocessor → NumberingCtrls → Compress Numbers，压缩面编号（图 8-50）。

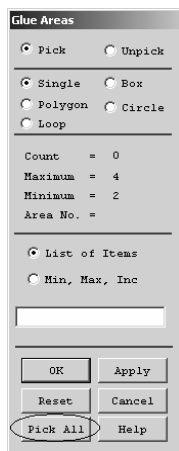


图 8-49 黏合所有面

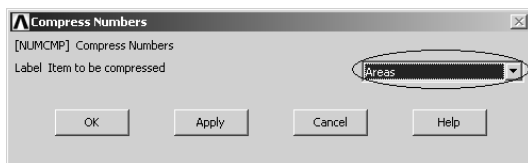


图 8-50 压缩面编号

3. 划分网格

(1) 定义不同面的材料属性

选择路径 Utility Menu → Select → Entities，选择“Areas”，“By Num/Pick”（图 8-51），然后选择面 1 和 2（图 8-52）。

然后选择路径 Main Menu → Preprocessor → Meshing → Mesh Attributes → Picked Areas，选择所有面，再设置材料属性为“2”（图 8-53）。然后选择“Sele All”选择全部面。

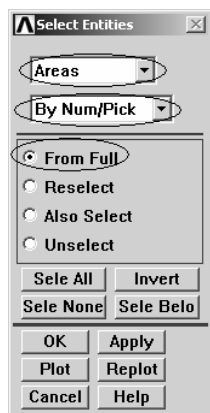


图 8-51 选择“Areas”，“By Num/Pick”

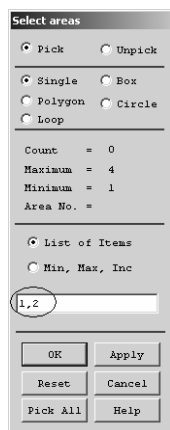


图 8-52 选择面 1 和 2

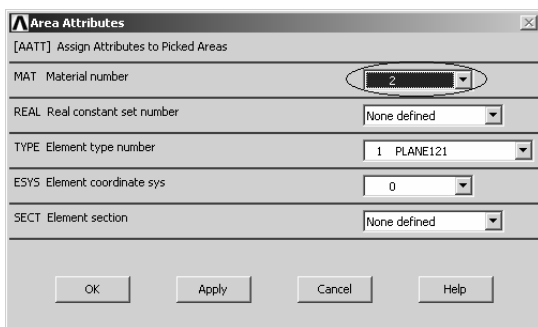


图 8-53 设置材料属性为“2”

用类似方法选择 $X = 0.25$, $Y = 1$ 处的线。

(2) 设定网格选项

选择路径 Main Menu → Preprocessor → Meshing → Size Cntrls → Lines → All Lines, “NDIV” 填入 “8” (图 8-54)。

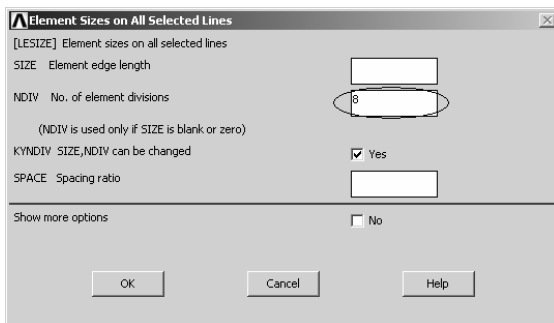


图 8-54 划分为 8 段

然后选择全部线。

之后选择路径 Main Menu → Preprocessor → Meshing → MeshTool, 设定级别为 “3” (图 8-55)。然后划分面的网格 (图 8-56)。



图 8-55 设定级别为“3”

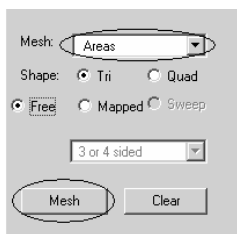


图 8-56 划分网格

4. 施加负载

选择路径 Utility Menu→Select→Entities，选择 $X=0.5$ ， $Y=1$ 的节点。然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage→On Nodes，设定电压为 V1（图 8-57）。

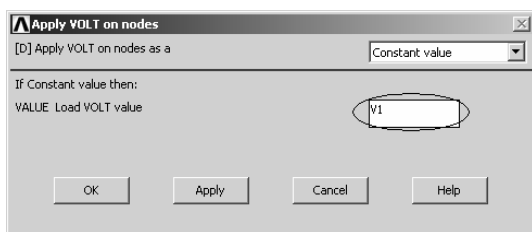


图 8-57 设定电压为 V1

然后选择 $Y=0$ ， $Y=10$ 和 $X=0.5$ 的节点，设置电压为 V0。之后选择全部节点。

5. 缩放面

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Scale→Areas，X,Y,Z 缩放分别为 0.1, 0.1, 0，IMOV 选择“Moved”（图 8-58）。

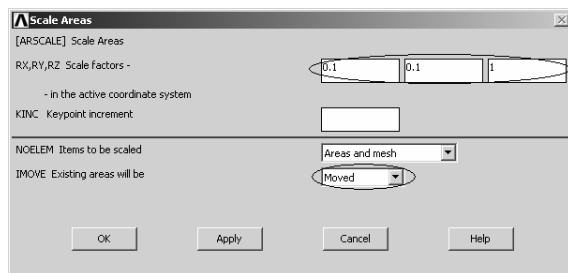


图 8-58 缩放面

6. 求解

选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS，求解。

7. 查看结果

(1) 定义表格

选择路径 Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table，定义表格

SENE。Lab 填入“SENE”，然后选择“Energy”，单击“Apply”按钮确认（图 8-59）。

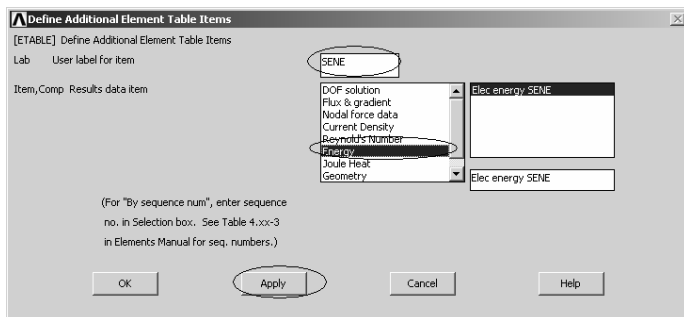


图 8-59 定义表格

类似方法，定义表格 EFX（图 8-60）。EFY 定义方法同 EFX。

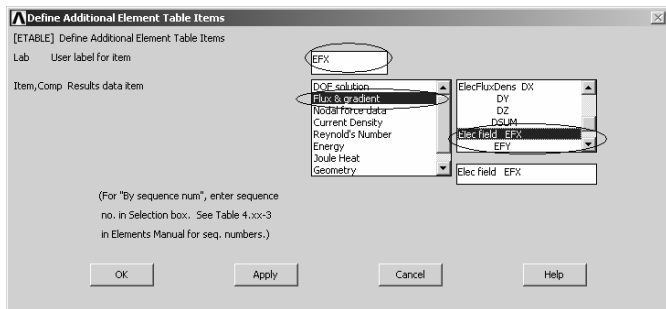


图 8-60 定义 EFX

(2) 绘制结果

绘制电压结果值。选择路径 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，绘制电压结果（图 8-61）。

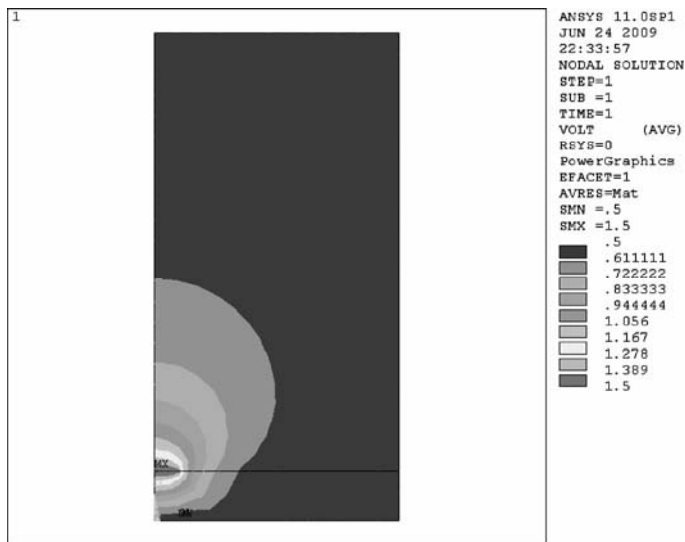


图 8-61 绘制电压结果

然后选择路径 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Vector Plot→User-defined, “Item” 和 “Lab2” 分别输入 EFX 和 EFY, 绘制电场矢量图 (图 8-62)。

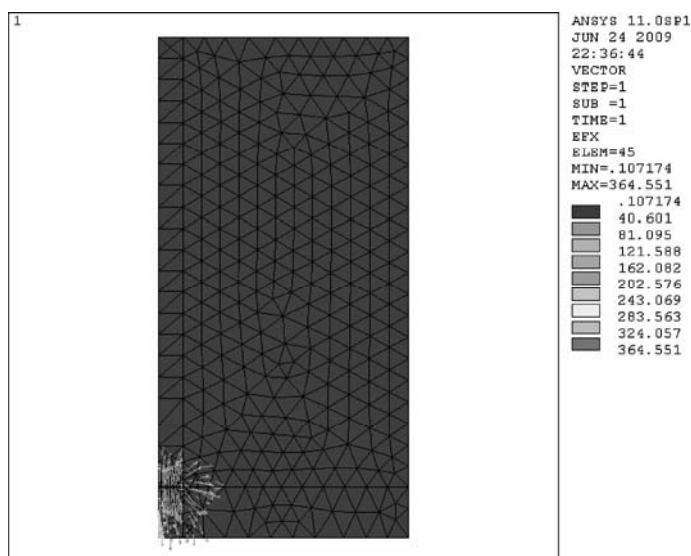


图 8-62 绘制电场矢量图

(3) 计算电容

选择路径 Main Menu→General Postproc→Element Table→Sum of Each Item, 进行能量求和 (图 8-63)。

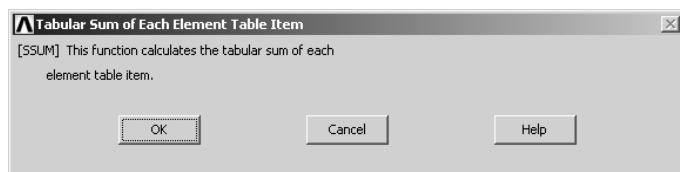


图 8-63 能量求和

选择路径 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data, 选择 “Results data”, “Elem table sums” (图 8-64), 单击 “OK” 按钮后填入 “W” (图 8-65)。

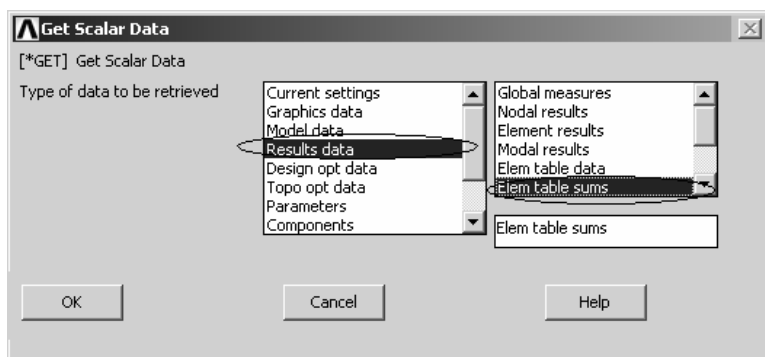


图 8-64 选择结果数据

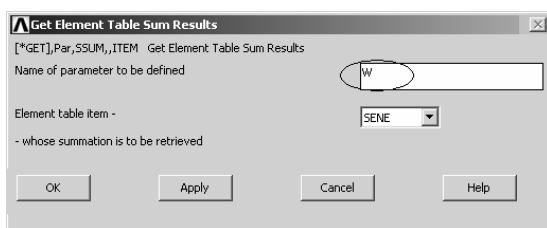


图 8-65 获取数据

然后选择路径 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，输入：

$$C=(W*2)/((V1-V0)**2)$$

$$C=((C*2)*1E12)$$

选择路径 Utility Menu→List→Status→Parameters→Named Parameter，“Name of parameter”选择“C”（图 8-66），弹出结果（图 8-67）。

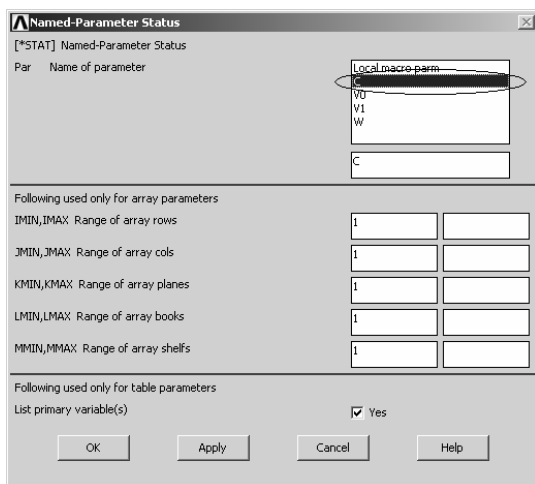


图 8-66 选择参数

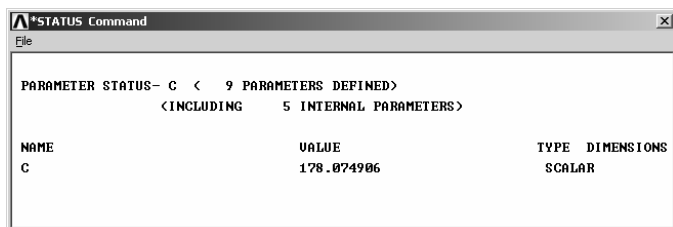


图 8-67 电容结果

8.3.2 命令流操作

```
/PREP7
```

```
ET,1,PLANE121
```

！二维静电场单元

```

V1=1.5                                ! 电压
V0=0.5
MP,PERX,1,1
MP,PERX,2,10
RECTNG,0,.5,0,1
RECTNG,.5,5,0,1
RECTNG,0,.5,1,10
RECTNG,.5,5,1,10
AGLUE,ALL
NUMCMP,AREA
ASEL,S,AREA,,1,2

AATT,2
ASEL,ALL                                ! 设置空气面属性
LSEL,S,LOC,Y,1
LSEL,R,LOC,X,.,25
LESIZE,ALL,,,8
LSEL,ALL
SMRTSIZE,3
MSHAPE,1                                ! 三角形网格
AMESH,ALL
NSEL,S,LOC,Y,1
NSEL,R,LOC,X,0,.,5
D,ALL,VOLT,V1                            ! 施加电压
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,A,LOC,Y,10
NSEL,A,LOC,X,5
D,ALL,VOLT,V0
NSEL,ALL
ARSCALE,ALL,,,01,01,0,0,1
FINISH
/SOLUTION
SOLVE
FINISH
/POST1
ETABLE,SENE,SENE                        ! 储存静电场能量
ETABLE,EFX,EFX                          ! 储存电场强度
ETABLE,EFY,EFY
/NUMBER,1
PLNSOL,VOLT                            ! 绘制等压线
PLVECT,EFX,EFY                        ! 绘制电场强度矢量线

```

```

SSUM                                ! 能量求和
*GET,W,SSUM,,ITEM,SENE
C=(W*2)/((V1-V0)**2)                ! 计算电容

C=((C*2)*1E12)                      ! 整体模型
*STATUS,C
FINISH

```

8.4 工程实例 4——梳状驱动器

一个梳状驱动器，仿真其一个单元。梳状驱动器与定子之间的空气间隙用 TRANS109 单元划分网格。电极使用耦合等压节点组建模。定子是固定的，转子可以动，与弹簧相连。地节点可以水平位移。弹簧力和静电力的平衡点在 $ux = 0.1 \mu\text{m}$ 位置。参数参见表 8-1。

表 8-1 参数

参数	N	h	Eps0	V	g
值	1.0	10	$8.854\text{e-}6$	4.0	5.0



结果文件

——附带光盘 “End\Ch8\实例 8-4” 文件夹



动画演示

——附带光盘 “AVI\Ch8\实例 8-4.avi”

8.4.1 GUI 操作

1. 设置参数

选择路径 Utility Menu→Parameters→Scalar Parameters，设置以下参数（图 8-68）：

```

eps0=8.854e-6
g0=5.0
h=10
L=100
x0=0.5*L
ftol=1.0e-5
esize=1.0
k=2.8333e-4
vltg=4.0

```

2. 建立模型

(1) 定义换能器单元

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，定义单元 TRANS109。

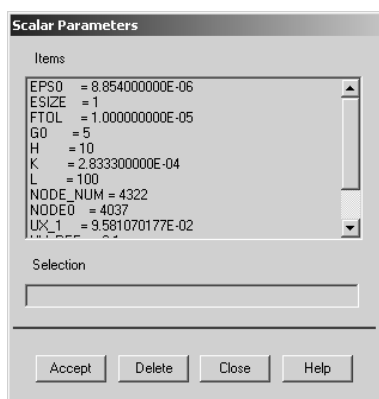


图 8-68 设置参数

再选择路 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Electromag Units, 定义此分析的单位制, 它通过定义介电常数来定义。首先选择“User-defined”(图 8-69), 再定义自由空间介电常数为 EPS0 (图 8-70)。

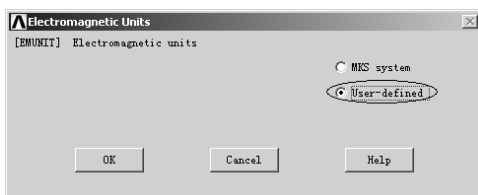


图 8-69 选择“User-defined”

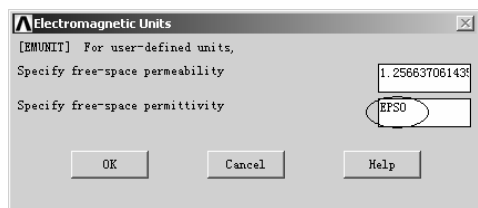


图 8-70 定义自由空间介电常数为 EPS0

然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models, 定义相对介电常数为 1 (图 8-71)。

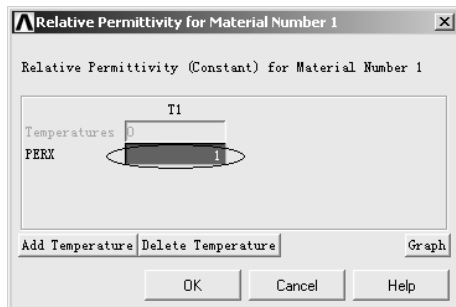


图 8-71 定义相对介电常数为 1

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete, 定义厚度为 1 (图 8-72)。

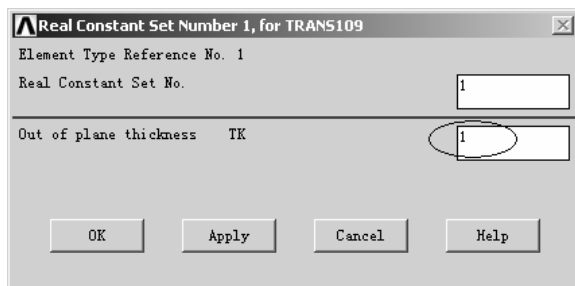


图 8-72 定义厚度为 1

(2) 定义弹簧

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete, 定义单元 COMBIN14。且其自由度选项 “K2” 选择 “Longitude UX DOF” (图 8-73)。

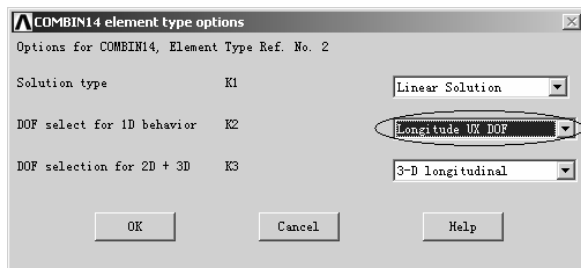


图 8-73 自由度选项 “K2” 选择 “Longitude UX DOF”

然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete, 定义其弹性系数为 “K” (图 8-74)。

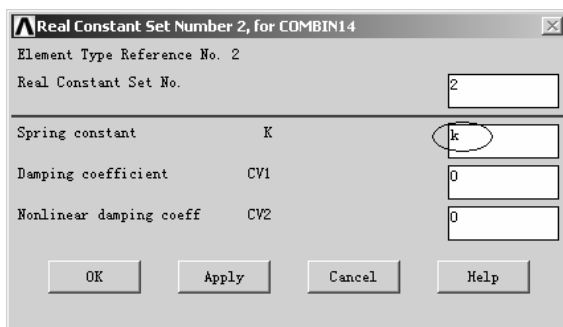


图 8-74 定义其弹性系数为 “K”

(3) 定义平面单元

使用类似方法, 定义 PLANE42, 设置其材料属性杨氏模量为 $169e3$, 泊松比为 0.25。

(4) 建立模型

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By2 Corners, 分别建立 XCORNER, YCORNER, WIDTH, HEIGHT 为 “0,-h/2,L,h” (图 8-75),

“-h,-h/2,h,h”, “-h,-h-g0,h,h/2+g0”, “-h,h/2,h,h/2+g0”, “L-x0,h/2+g0,L,h/2”, “L-x0,-h-g0,L,h/2”, “0,-h-g0,2*L-x0,2*(h+g0)” 的矩形。

然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Areas, 重叠所有面 (图 8-76)。

最后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrl's→Merge Items, 合并所有重合关键点 (图 8-77)。

3. 关联面和单元属性

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas, 将面 1,8,9,10 (图 8-78) 设置为材料 2, 实常数 3, 单元类型 3 (图 8-79)。

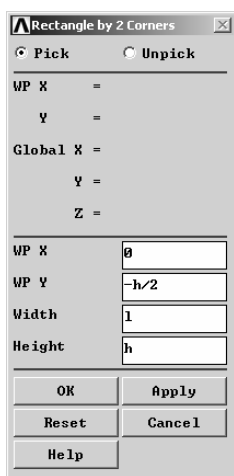


图 8-75 建立矩形

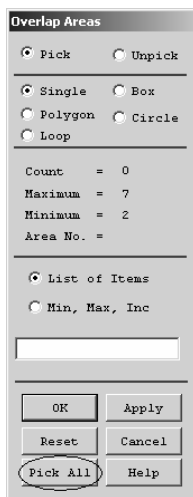


图 8-76 重叠所有面

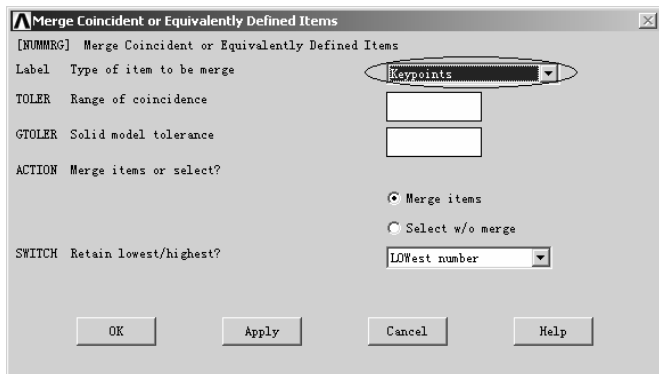


图 8-77 合并所有重合关键点

4. 划分网格

(1) 空气间隙

选择路径 Utility Menu→Select→Entities (图 8-80), 选择面 11 (图 8-81)。

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool, 设置全局单元大小 (图 8-82),

设置为 esize (图 8-83)。

使用三角形自由网格, 然后单击 “Mesh” 按钮划分网格 (图 8-84)。

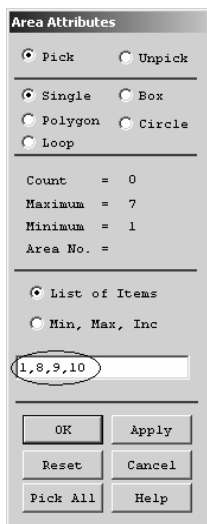


图 8-78 选择面 1, 8, 9, 10

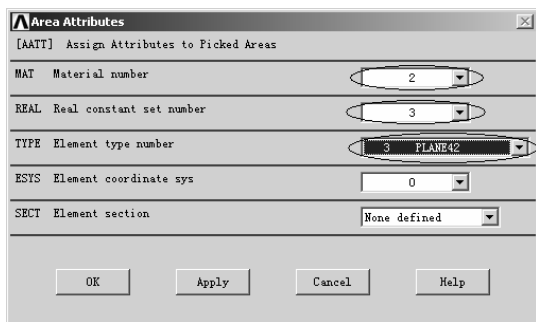


图 8-79 设置为材料 2, 实常数 3, 单元类型 3

用类似方法, 设置面 11, 材料、实常数和单元都为 1。



图 8-80 选择面

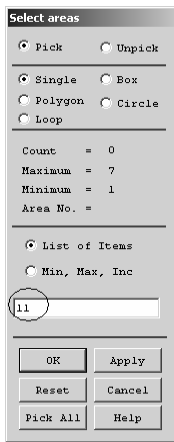


图 8-81 选择面 11

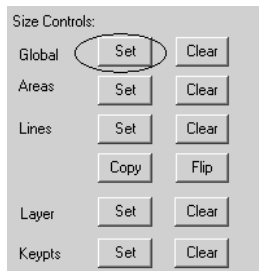


图 8-82 按钮设置全局单元大小

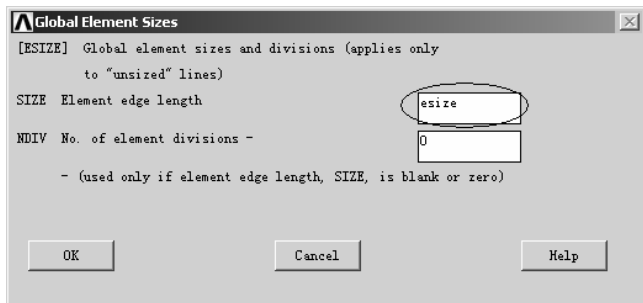


图 8-83 设置单元大小

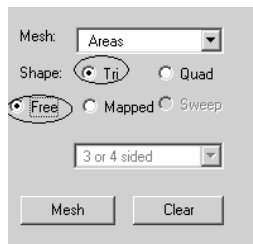


图 8-84 划分网格

选择路径 Utility Menu→Select→Entities (图 8-80), 单击“Sele all”按钮选择全部面。

(2) 活动部分

类似方法, 选择面 1,8,9,10, 设置全局单元大小为 esize, 采用四边形映射网格。然后划分网格。最后选择全部面。

(3) 弹簧单元

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Default Attribs, 选择单元 2, 实常数 2 (图 8-85)。

然后定义弹簧单元。选择路径 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data, 选择“Model data”, “For selected set” (图 8-86), 获取选中对象的节点数, 命名为“node_num” (图 8-87)。

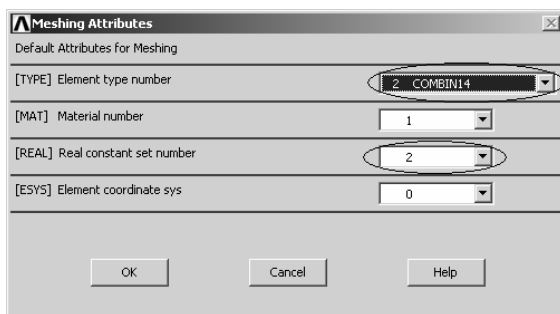


图 8-85 关联属性

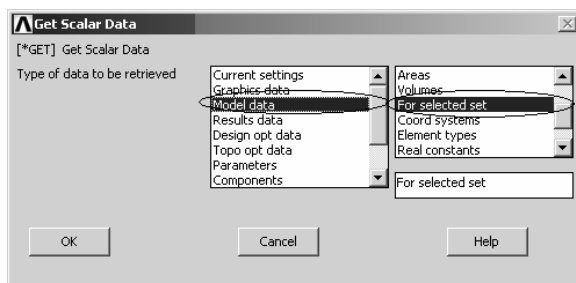


图 8-86 选择“Model data”和“For selected set”

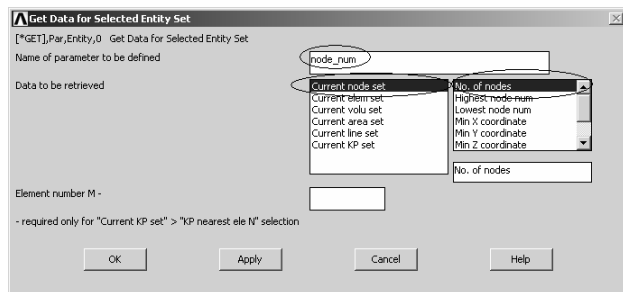


图 8-87 获取选中对象的节点数

接着选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS, 在
原点建立第 node_num+1 个节点。

然后选择路径 Utility Menu→Select→Entities, 选择 $x = -h$, $y = 0$ 处的节点。然后选择路径: Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data, 选择“Model data”, “For selected set”(图 8-86), 获取选中对象的节点编号, 命名为 node0 (图 8-88)。

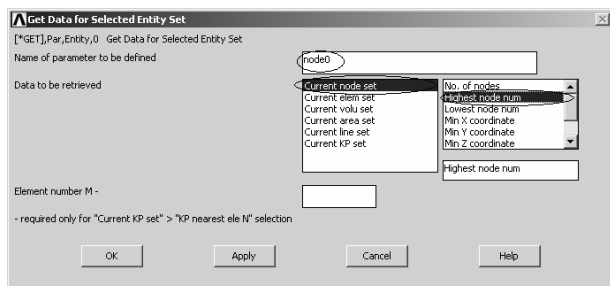


图 8-88 获取选中对象的节点编号

最后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes, 连接 node0 和 node_num+1 建立单元。

5. 边界条件

(1) 建立组件

选择路径 Utility Menu→Select→Entities, 选择线 15,33,3,2,1,31,9, 然后选择选中线上的所有节点 (图 8-89)。

然后选择路径 Utility Menu→Select→Comp/Assembly→Create Component, 建立组件“rotor”(图 8-90)。

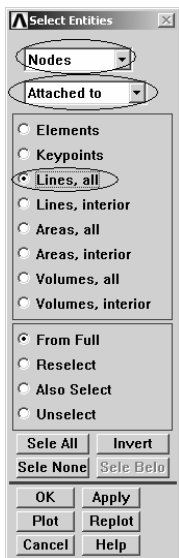


图 8-89 选择选中线上的所有节点



图 8-90 建立组件“rotor”

然后选择全部。

接着采用类似方法, 选择线 20,17,37,23,24 上的左右节点, 将这些节点建立组件“ground”, 最后选择全部。

(2) 定义边界条件

选择路径 **Utility Menu**→**Select**→**Entities**，选择 $y = -(h+g_0)$ 和 $h+g_0$ 处的节点。然后选择路径 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Displacement**→**On Nodes**，限定这些节点 $u_y = 0$ ，选择全部。

用类似方法，设定节点 $node_num+1ux=0$ 。

选择路径 **Utility Menu**→**Select**→**Comp/Assembly**→**Select Comp/Assembly**，根据名称（图 8-91）选择“ground”组件（图 8-92）。

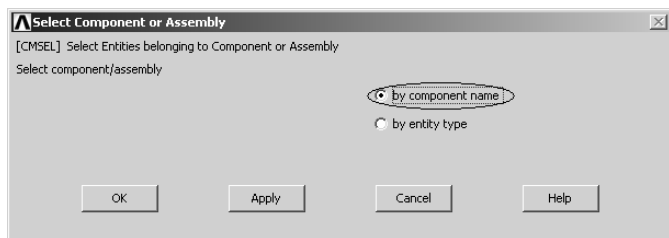


图 8-91 根据名称选择

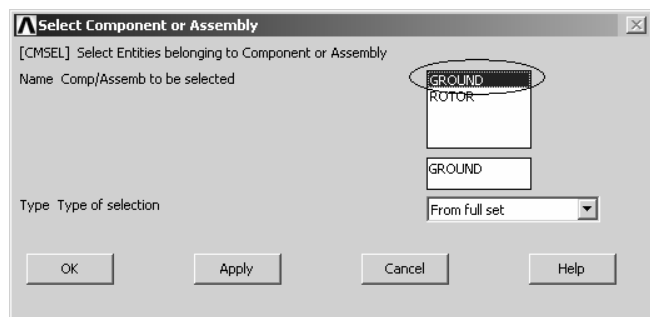


图 8-92 选择“ground”组件

然后选择路径 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Electric**→**Boundary**→**Voltage**→**On Nodes** 和 **Main Menu**→**Solution**→**Define Loads**→**Apply**→**Structural**→**Displacement**→**On Nodes**，设置电压 $volt$ 和位移 u_y 为 0。选择全部。

选择线 20,37,24 上的所有节点，限制 u_x 为 0。

然后选择 rotor 组件，设定电压为 $vltg$ 。选择全部。

6. 求解

选择路径 **Main Menu**→**Solution**→**Analysis Type**→**Analysis Options**，设定求解方法 $iccg$ （图 8-93）。

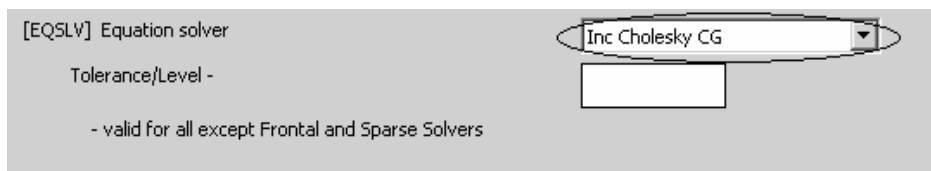


图 8-93 设定求解方法

然后选择路径 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls, 设置非线性收敛对象 F, 值为“ftol”(图 8-94)。

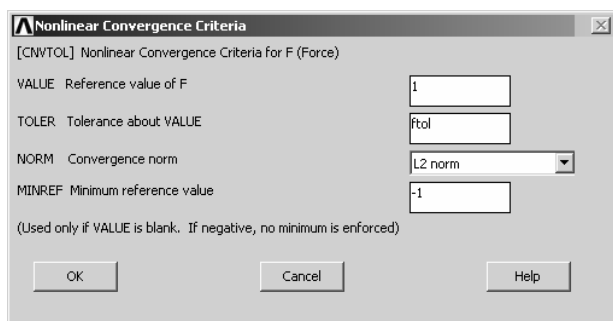


图 8-94 设置非线性收敛对象

然后设置大位移选项, 子步、最大子步和最小子步分别为 20,100,20, 以及所有求解项目写入文件(图 8-95)。

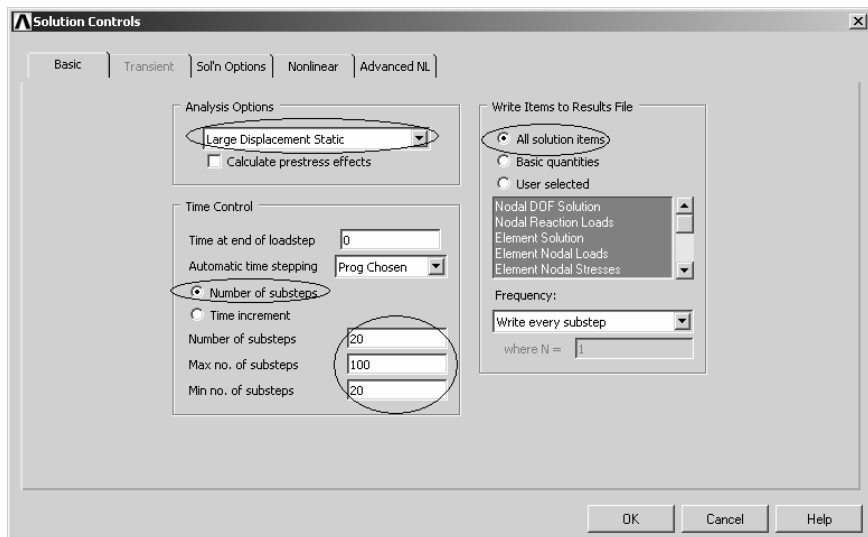


图 8-95 设置求解选项

最后求解。

7. 查看结果

选择路径 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu, 绘制电压分布结果(图 8-96)。

8.4.2 命令流操作

! 设置参数

EPS0=8.854E-6

G0=5.0

H=10

! 真空介电常数

! 初始间距

! 宽度

L=100

! 长度

X0=0.5*L

! 重叠部分

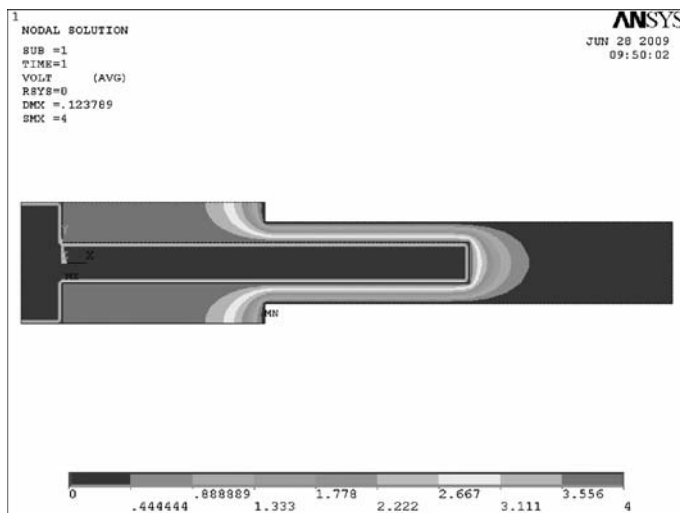


图 8-96 电压分布结果

FTOL=1.0E-5

! 收敛容差

ESIZE=1.0

! 单元大小

K=2.8333E-4

! 弹性系数

VLTG=4.0

! 电压

! 建立模型

/PREP7

ET,1,TRANS109,,

! 定义换能器单元

EMUNIT,EPZRO,EPS0

MP,PERX,1,1

R,1,1.0

ET,2,COMBIN14,,1

! 弹簧, UX 自由度

R,2,K

! 设定弹性系数

ET,3,42

! 活动部分单元

MP,EX,2,169E3

MP,NUXY,2,0.25

R,3,

BLC4,0,-H/2,L,H

! 建立模型

BLC4,-H,-H/2,H,H

BLC4,-H,-H-G0,H,H/2+G0

BLC4,-H,H/2,H,H/2+G0

BLC4,L-X0,H/2+G0,L,H/2

BLC4,L-X0,-H-G0,L,H/2

BLC4,0,-H-G0,2*L-X0,2*(H+G0)

AOVLAP,ALL

NUMMRG,KP

! 关联面和单元属性

ASEL,S,AREA,,1

! 活动部分

ASEL,A,AREA,,8

ASEL,A,AREA,,9

ASEL,A,AREA,,10

AATT,2,3,3

ASEL,S,AREA,,11

! 空气间隙

AATT,1,1,1

ALLS

! 划分网格

ASEL,S,AREA,,11

! 空气间隙

ESIZE,ESIZE

MSHAPE,1,2

MSHKEY,0

AMESH,ALL

ALLS

ASEL,S,AREA,,1

! 活动部分

ASEL,A,AREA,,8

ASEL,A,AREA,,9

ASEL,A,AREA,,10

ESIZE,ESIZE

MSHAPE,0,2

MSHKEY,1

AMESH,ALL

ALLS

! 弹簧单元

TYPE,2

REAL,2

```
*GET,NODE_NUM,NODE,,COUNT
N,NODE_NUM+1,0.0,0.0
NSEL,S,LOC,X,-H
NSEL,R,LOC,Y,0.0
*GET,NODE0,NODE,,NUM,MAX
E,NODE0,NODE_NUM+1
ALLS
```

! 定义边界条件

```
LSEL,S,LINE,,15
LSEL,A,LINE,,33
LSEL,A,LINE,,3
LSEL,A,LINE,,2
LSEL,A,LINE,,1
LSEL,A,LINE,,31
LSEL,A,LINE,,9
```

```
NSLL,S,1
CM,ROTOR,NODE
ALLS
```

! 建立组件 “ROTOR”

```
LSEL,S,LINE,,20
LSEL,A,LINE,,17
LSEL,A,LINE,,37
LSEL,A,LINE,,23
LSEL,A,LINE,,24
```

```
NSLL,S,1
CM,GROUND,NODE
ALLS
FINI
```

! 建立组件 “GROUND”

```
/SOLU
NSEL,S,LOC,Y,-(H+G0)
NSEL,A,LOC,Y,H+G0
D,ALL,UY,0
ALLS
D,NODE_NUM+1,UX,0.0
CMSEL,S,GROUND
D,ALL,VOLT,0.0
D,ALL,UY,0.0
ALLS
```

! 定义边界条件

```
LSEL,S,LINE,,20
LSEL,A,LINE,,37
LSEL,A,LINE,,24
NSLL,S,1
D,ALL,UX,0.0
CMSEL,S,ROTOR
D,ALL,VOLT,VLTG
ALLS
FINI
```

! 求解

```
/SOLU
EQLV,ICCG
SOLNCTRL,ON
CNVTOL,F,1,FTOL
NLGEOM,ON
OUTRES,ALL,ALL
NSUBST,20,100,20
SOLVE
FINI
```

! 查看结果

```
/POST1
PLNSOL,VOLT
FINI
```

8.5 工程实例 5——带电导体球周围电场分布

两个带电导体球，半径分别为 2，球心相距 10，电压分别为 -5V 和 5V 。求解导体球周围电场分布（图 8-97）。

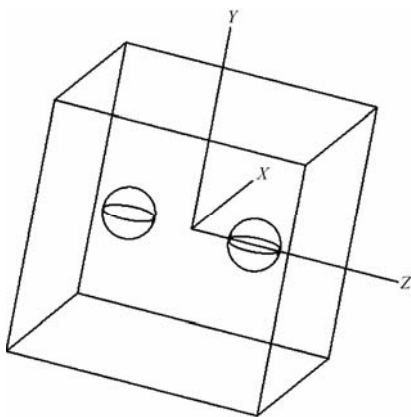


图 8-97 两个带电导体球

本例采用导入外部模型和 ANSYS 建模混合方式建模，其中两个球采用外部模型导入，而自由空间矩形采用 ANSYS 建模，从而使读者初步掌握外部模型导入方法和混合建模方法。

**结果文件**

——附带光盘 “End\Ch8\实例 8-5” 文件夹

**动画演示**

——附带光盘 “AVI\Ch8\实例 8-5.avi”

8.5.1 GUI 操作

1. 导入外部模型

(1) 导入模型

导入 IGES 模型。选择路径 Utility Menu→File→Import→IGES，选择 “No defeaturing”（图 8-98），此方式占用内存小，不过需要用户适当修改模型。

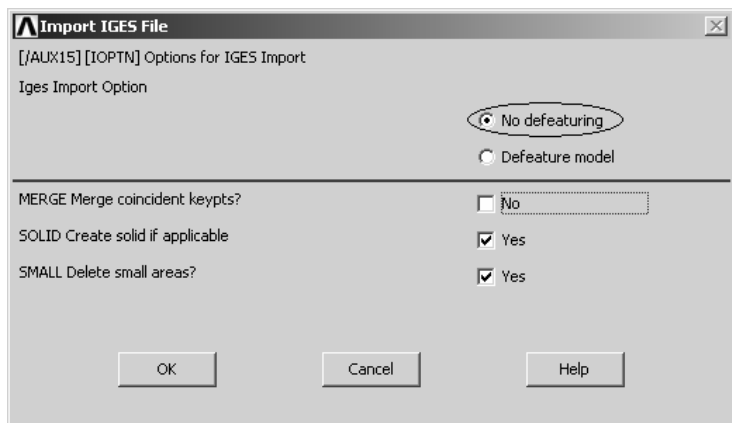


图 8-98 选择 “No defeaturing”

单击 “OK” 按钮后，选择模型文件。将此文件存放于工作目录下，名称为 “model.igs”（图 8-99），如果文件不在工作目录下，输入完整的路径即可。

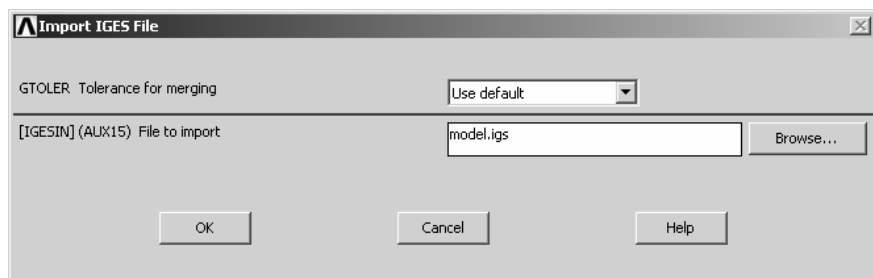


图 8-99 选择模型文件

导入后效果如图 8-100 所示。

(2) 整合模型

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Merge Items，结合所有等效或者重合对象（图 8-101）。

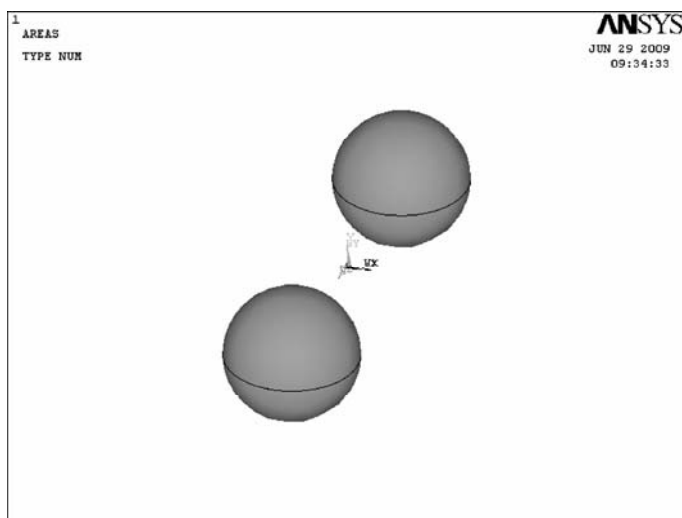


图 8-100 导入的模型

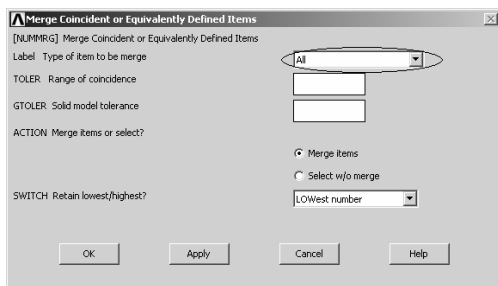


图 8-101 结合所有等效或者重合对象

然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers，压缩所有对象编号（图 8-102）。

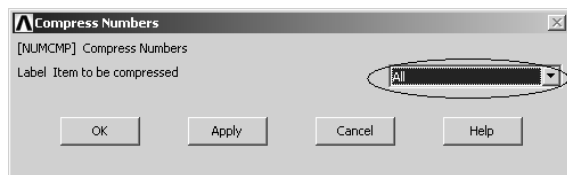


图 8-102 压缩所有对象编号

最后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Arbitrary→By Areas，连接各自球的面形成球体。

2. 使用 ANSYS 建立周围环境模型

选择路径 Utility Menu→WorkPlane→Offset WP by Increments，Z 方向平移工作平面-10（图 8-103）。

然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Centr,Cornr,Z，在工作平面原点建立长宽高均为 20 的立方体（图 8-104）。

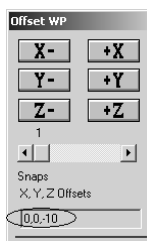


图 8-103 Z 方向平移工作平面-10



图 8-104 在工作平面原点建立长宽高均为 20 的立方体

然后将工作平面恢复原位。选择路径 Utility Menu→WorkPlane→Align WP with→Global Cartesian。

最后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Volumes，将所有体重合操作，建立最终实体模型。

3. 定义单元并关联单元和模型

(1) 定义单元及材料属性

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，建立单元 SOLID122 和 INFIN110。

然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models，定义材料 1 的相对介电常数为 1。

(2) 关联属性

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Volumes，选择体 4，设置单元和材料为 1（图 8-105）。

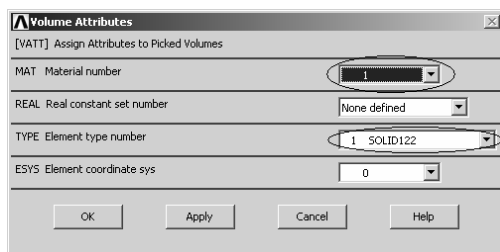


图 8-105 设置单元和材料为 1

然后，类似方法，选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas，选择面 5～10，设置材料为 1，单元为 2。

4. 划分网格

选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrl→SmartSize→Adv Opts，保持所有默认选项，单击“OK”按钮确认（图 8-106）。

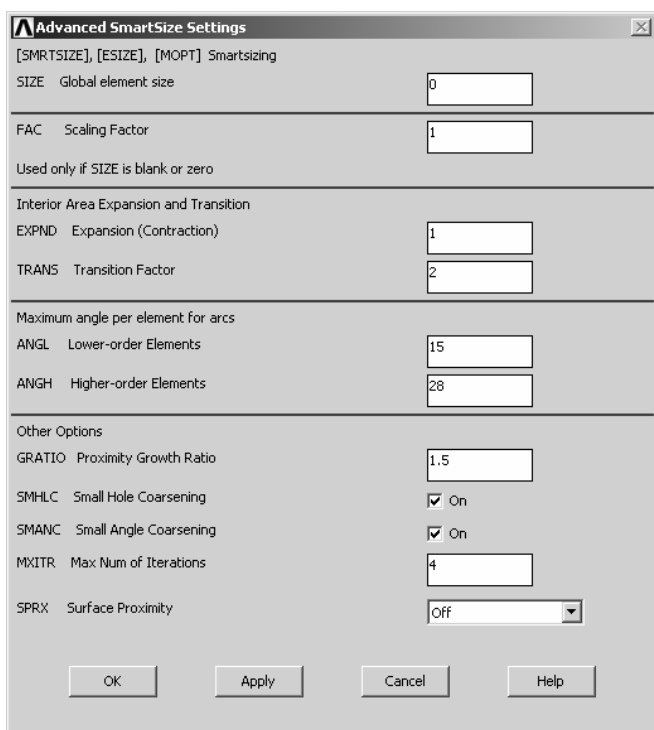


图 8-106 保持所有默认选项

然后选择路径 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Free，划分体 4。

因为导体球电位相等，不需要网格计算。

选择路径 Utility Menu→Select→Everything，选择全部。

5. 施加电压负载并求解

选择路径 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage→On Areas，在面 1,2 施加电压 5V，面 3,4 施加电压-5V。

然后选择路径 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 求解。

6. 查看结果

(1) 绘制电场强度矢量图

选择路径 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Edge Options，选择“Edge Only/ All”不显示单元边界（图 8-107）。

选择路径 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Vector Plot→User-defined，“Item”输入“ef”，“Mode”选择“Vector Mode”，绘制电场强度矢量图（图 8-108）。结果如图 8-109 所示。

(2) 绘制界面电场强度分布图

选择路径 Utility Menu→WorkPlane→Offset WP by Increments 将工作平面沿 Z 轴旋转 90°（图 8-110）。然后选择路径 Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Create Surface→On Cuttng Plane 建立名称为“ELECEF”的面（图 8-111）。

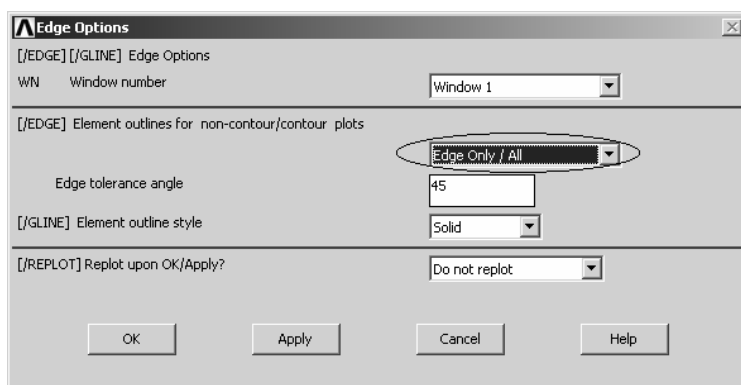


图 8-107 不显示单元边界

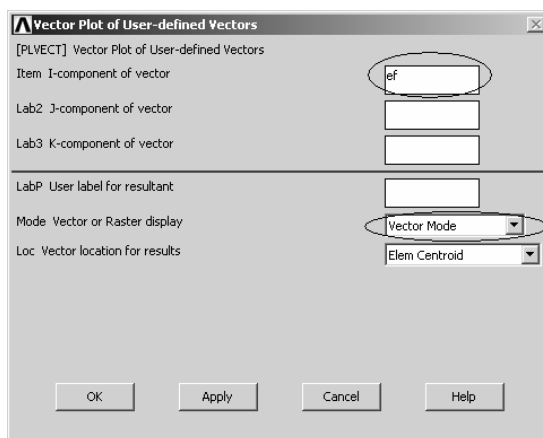


图 8-108 绘制电场强度矢量图

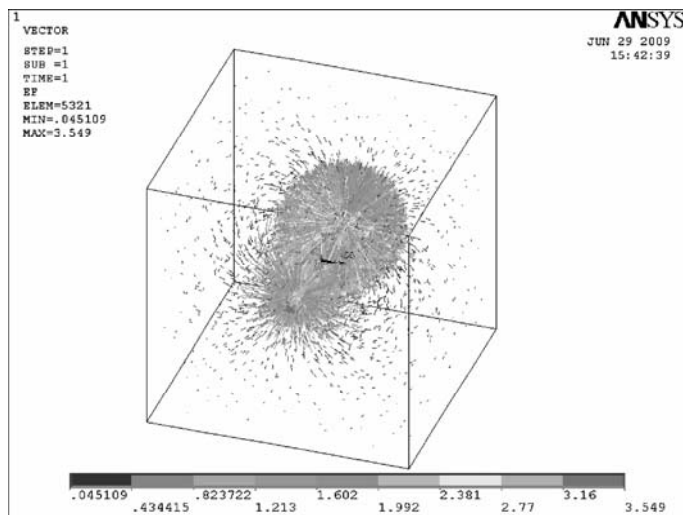


图 8-109 电场强度矢量图

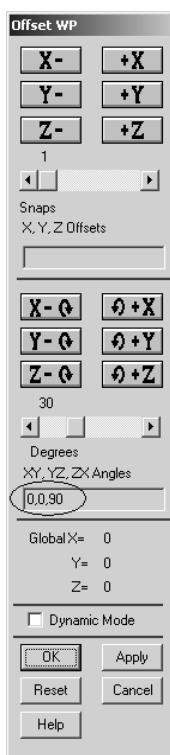


图 8-110 将工作平面沿 Z 轴旋转 90°

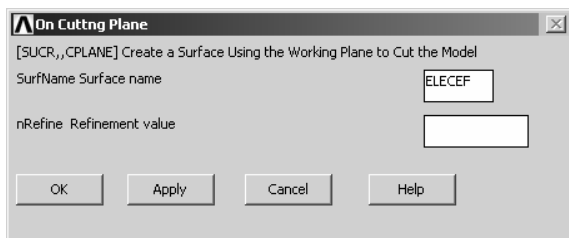


图 8-111 建立面

然后选择路径 Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Select Surfaces 选择此面 (图 8-112)。

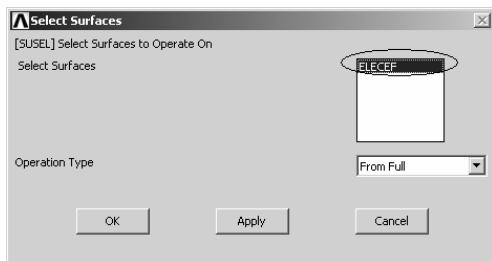


图 8-112 选择此面

接着将 EF 的 SUM 部分映射到此面。选择路径 Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Clear Results 映射 (图 8-113)。

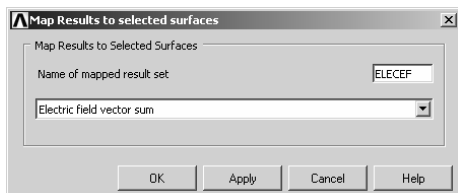


图 8-113 将 EF 的 SUM 部分映射到此面

然后绘制结果。选择路径 Main Menu→General Postproc→Surface Operations→Plot Results 绘制电场强度（图 8-114）。

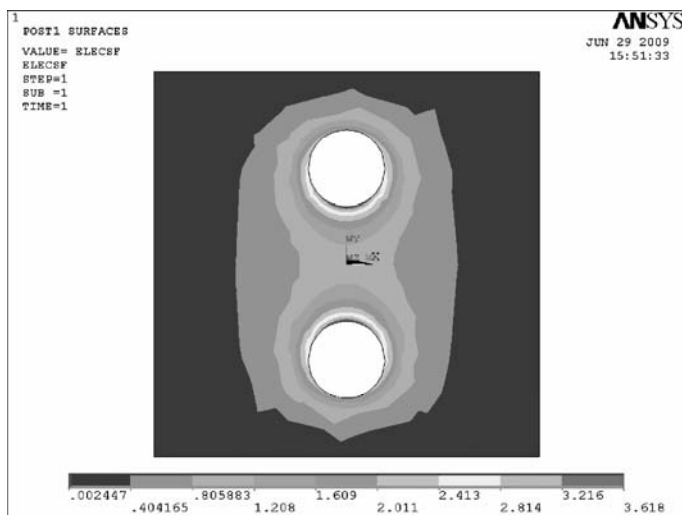


图 8-114 绘制电场强度

8.5.2 命令流操作

！ 导入模型

/AUX15

IOPTN,IGES,SMOOTH

IGESIN,MODEL,IGS

FINI

！ 建立模型

/PREP7

NUMMRG, ALL

！ 整合所有对象

NUMCMP,ALL

VA,1,2

！ 建立体

VA,3,4

WPOFFS,,,-10

BLC5, 0, 0, 20, 20, 20

！ 建立立方体

WPCSYS,1,0

VOVLAP,ALL

ET,1,SOLID122

！ 定义单元

MP,PERX,1,1

ET,2,INFIN110

! 划分网格

VSEL,S,VOLU,,4

! 关联单元和实体模型

VATT,1,,1

SMRTSIZE,,,,,,,,,ON

! 开启小孔控制

MSHKEY,0

MSHAPE,1,3D

VMESH,ALL

! 划分网格

ASEL,S,AREA,,5,10,1

! 关联单元和实体模型

AATT,1,,2

NSLA,S,1

ALLS

! 选择全部

FINI

! 求解

/SOLU

ASEL,S,AREA,,1,2

! 施加负载

DA,ALL,VOLT,5

ASEL,S,AREA,,3,4

DA,ALL,VOLT,-5

SOLVE

! 求解

FINI

! 查看结果

/POST1

PLVECT,EF,,,VECT,,ON

! 矢量图

WPROTA,,90

SUCR,ELECSF,CPLANE

SUSEL,S,ELECSF

SUMAP,ELECSF,EF,SUM

SUPL,ELECSF,ELECSF

! 截面电场强度